LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 47
luglio 1972
anno V
volume IX

Gli aspetti politici degli aiuti economici

Solo ponendo in risalto l'aspetto morale si potrebbe invertire l'attuale tendenza verso una diminuzione degli aiuti ai paesi sottosviluppati da parte dei paesi ricchi

di Gunnar Myrdal

Nell'ottobre dell'anno scorso il senato degli Stati Uniti decise con una schiacciante maggioranza di sopprimere gli stanziamenti annui per l'aiuto economico ai paesi sottosviluppati. Sebbene, in un secondo tempo, i fondi venissero ripristinati a un livello piú basso, il voto del senato espresse l'unanime disillusione sia dei piú convinti sostenitori della politica degli aiuti all'estero sia dei piú accesi oppositori. Tutti i partiti furono concordi nel riconoscere che la somma di 70 miliardi di dollari stanziata per gli aiuti all'estero negli anni successivi alla fine della seconda guerra mondiale non aveva dato alcun risultato positivo a causa delle motivazioni confuse che l'avevano accompagnata. Il « programma di carità verso le nazioni straniere », agli occhi dell'opposizione, non aveva fruttato agli Stati Uniti « né gratitudine » « né amici »; all'assemblea delle Nazioni Unite, pochi giorni prima del voto del senato, 46 nazioni, le quali beneficiavano degli aiuti americani, votarono contro la proposta degli Stati Uniti di riconoscere la Repubblica Popolare Cinese. Parlando a favore dei sostenitori della politica degli aiuti esteri, il senatore Frank Church deplorò la confusione che veniva fatta fra le motivazioni umanitarie e gli obiettivi della guerra fredda e fra l'aiuto economico e l'impegno militare negli accordi degli Stati Uniti con le nazioni piú povere; egli ripeté la dichiarazione piena di rimorso fatta, a suo tempo, dal capitano Cook a proposito degli abitanti delle isole del Pacifico: « Sarebbe stato meglio, per questa gente, non averci mai conosciuti ».

Il problema degli aiuti all'estero è stato quest'anno di nuovo all'ordine del giorno nella seconda sessione del novantaduesimo Congresso, ma il disegno di legge, pieno di compromessi, che ne è emerso, non ha certamente posto la parola fine a questa controversia. Mi propongo, in questo articolo, di esaminare le motivazioni e gli obiettivi che il programma dei futuri aiuti economici si prefigge, con la speranza che queste mie considerazioni possano portare, in futuro, la discussione del problema su basi piú solide e, quindi, piú sicure.

In particolare, esaminerò la teoria, cosí spesso accettata dai piú ardenti sostenitori del programma, che è poi una variante della classica argomentazione liberale secondo la quale il commercio promuove la pace nel mondo. L'aiuto economico viene presentato come una specie di corollario agli accordi commerciali che, secondo la teoria classica, concorrono a sviluppare l'armonia internazionale. Di conseguenza, nella deliberazione dell'assemblea generale delle Nazioni Unite che annunciava il programma di sviluppo per il secondo decennio, lo sviluppo e la collaborazione internazionale vengono definiti: « la strada principale verso la pace ».

Per mettere subito le cose in chiaro, dirò che non credo che la politica economica possa contribuire granché al mantenimento della pace. Durante tutto il secolo precedente la prima guerra mondiale e sino a oggi, siamo stati portati a mettere troppo in evidenza le implicazioni economiche contenute nelle relazioni internazionali. La teoria liberale dell'economia, dagli scrittori classici in poi, su questo non differisce molto dalla posizione marxista, cosí come è ripresa dalla dottrina ufficiale dei paesi comunisti ed espressa in termini generali dai loro statisti e scienziati. Sia gli uni che gli altri affermano che il commercio promuove pacifiche relazioni politiche. Sebbene vi possa essere, in questa teoria, un elemento di ragione, io sostengo che esso sia di poco peso e fortemente condizionato. Le relazioni causali molto piú importanti vanno nella direzione opposta: date circostanze politiche portano il commercio a un basso livello e a una distorsione delle sue strutture, che sono i segni indicatori di quanto il clima politico non sia favorevole alla pace.

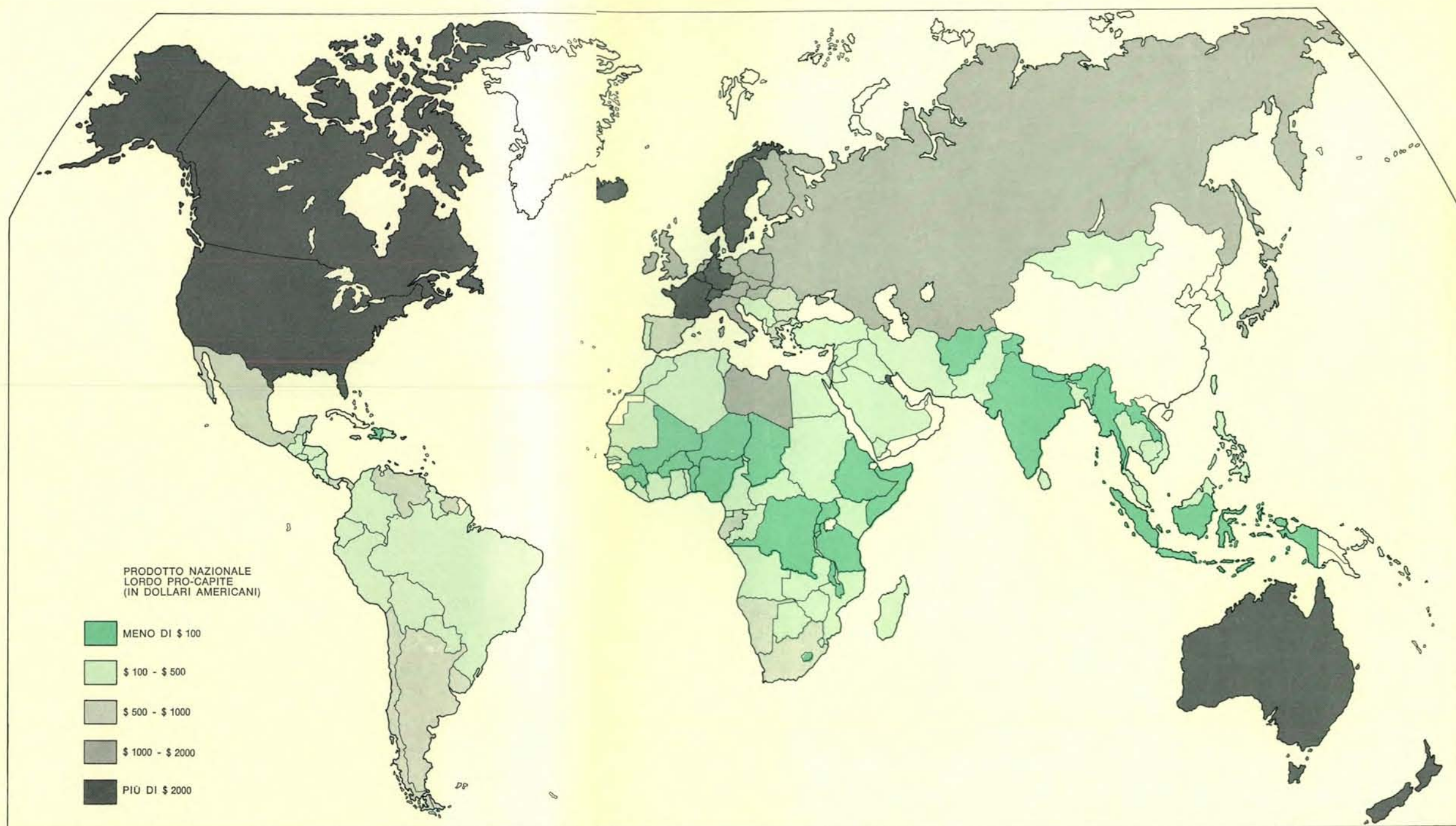
La politica è il potere supremo. Non si può stabilire una linea politica di democrazia fra due stati senza che le loro relazioni economiche non ne vengano colpite. Anche un confine che ponga le piú « innaturali » barriere economiche alle relazioni commerciali ed economiche tende, col tempo, a divenire « naturale » nel senso che le condizioni economiche di ambedue le

parti si inseriscono nella condizione politica che si è venuta a creare. Per questa ragione la linea di demarcazione che divideva l'India dal Pakistan pose fine ai legami commerciali e finanziari esistiti per secoli fra questi due paesi. Una simile divisione non solo può portare a terribili inibizioni e ostacolare lo sviluppo economico di ambedue i paesi, ma può anche, come ci ha dimostrato la storia recente, comportare una grave minaccia alla pace. I fattori determinanti di un simile sviluppo negativo non sono di ordine economico, ma politico. Anche delle città, come Berlino e Gerusalemme, possono venire brutalmente divise da una linea di confine politico, espressa fisicamente con un muro o una striscia di terra di nessuno. Una politica di negoziati può creare condizioni di stabilità, qualora il commercio sia compromesso, e relazioni finanziarie tali che, grazie a queste condizioni, possono essere tramutate da « innaturali » in « naturali », o perlomeno in « piú naturali ».

D'altra parte, le forze politiche possono, quasi di colpo, arrestare le relazioni economiche: è generalmente una operazione difficile e lunga tentare di ristabilirne la normalità, invertendo il processo. Anche nell'evento di una nuova e favorevole situazione politica sarebbe quasi impossibile riportare la situazione economica al livello pre-esistente. Il processo di adattamento delle forze economiche a un livello commerciale piú basso deve inevitabilmente condurre la distribuzione delle risorse verso la via dell'autosufficienza. Possiamo quindi escludere, quasi del tutto, il ritorno a uno *status quo ante*, proprio a causa del risultato finale venutosi a creare in seguito a questi processi chiusi in un circolo vizioso e generati da eventi politici.

Una profonda conoscenza dell'importanza sempre maggiore delle condizioni e dei cambiamenti di carattere politico è la base essenziale per poter seguire l'attuale corso degli eventi economici fra l'Europa occidentale e quella orientale. Durante gli anni fra le due guerre mondiali le relazioni economiche e commerciali fra la Russia e il resto dell'Europa (inclusi i paesi dell'Europa orientale e centrale che ora fanno parte del blocco sovietico) rimasero a un livello molto basso. La spiegazione, chiaramente, risiede nelle difficili relazioni politiche che si stabilirono fra l'insicuro paese rivoluzionario e i suoi vicini, ostili, preoccupati e anche impauriti, sin dalla rivoluzione di ottobre. In questo periodo la Russia perseguí una politica internazionale economica e commerciale tesa soprattutto a un adattamento alla realtà politica del momento. L'alleanza militare contro la Germania e l'Italia portò alla Russia un aiuto economico e militare degli Stati Uniti. Alla fine della guerra le relazioni economiche fra l'occidente e l'oriente tornarono subito al basso livello dell'anteguerra e rimasero statiche per quasi dieci anni.

Ancora una volta la causa era di carattere politico, e precisamente si identificava con la sempre piú intensa « guerra fredda ». Il blocco commerciale sovietico, però, questa volta includeva i paesi socialisti dell'Europa orientale, legati all'Unione Sovietica da vincoli di carattere politico.

Un importante strumento politico che rafforzò il divieto di commercio fra l'est e l'ovest fu la legge strategica sull'esportazione, imposta dagli Stati Uniti. Questi controlli furono accettati, sebbene a malincuore, dai paesi europei occidentali come dagli altri paesi del mondo che commerciavano con gli Stati Uniti. A posteriori si è visto che questa linea politica non era stata mal vista da Stalin. Durante gli anni nei quali l'Unione Sovietica cercava di rafforzare il suo blocco orientale, Stalin, indubbiamente, si serví di questa politica americana per dimostrare efficacemente che i paesi sovietici satelliti dovevano contare unicamente su se stessi e sulla collaborazione della Russia, non solo per la loro difesa, ma anche per il loro sviluppo economico. Il lato economico della guerra fredda offriva, in quegli anni, una chiara dimostrazione del processo circolare di causa-effetto. In questo caso il circolo vizioso si rafforzava per una specie di « cooperazione » fra le due potenze maggiori, in quanto ciascuna nel corso del conflitto reagiva in modo eccessivo in previsione della reazione dell'altra alle proprie iniziative. La morte di Stalin nel 1953 fu l'inizio di significativi cambiamenti politici da parte del-

Le nazioni ricche e povere sono classificate, su questa carta, secondo il livello del loro prodotto nazionale lordo pro-capite, espresso in dollari americani (*si veda in basso a sinistra*). Le statistiche sulle quali sono basate le categorie sono del 1967, l'anno piú recente nel quale è stato possibile avere le cifre di tutti i paesi. I dati sono stati raggruppati, da varie fonti ufficiali e ufficiose, dal Centro per la programmazione e lo sviluppo del segretariato delle Nazioni Unite. Le cifre della maggior parte dei paesi, sia di quelli ricchi che di quelli sottosviluppati, sono state determinate sulla base dei prezzi correnti di mercato. Le cifre per alcune delle economie a pianificazione coercitiva sono state determinate attraverso un altro processo e non possono, quindi, essere del tutto paragonabili a quelle degli altri paesi. I dati economici per il 1967 non sono disponibili per i paesi e i territori figurati in bianco. Il giudizio dell'autore è che le statistiche disponibili sul prodotto nazionale lordo pro-capite e su altri parametri dello sviluppo economico sono « fortemente inattendibili e spesso di nessuna utilità ». Le illustrazioni che accompagnano questo articolo sono state approntate dalla redazione di « Scientific American » per sottolineare alcuni aspetti generali del problema; nel caso della presente figura per mostrare la disordinata distribuzione geografica delle regioni ricche e di quelle sottosviluppate.

la Russia. A quell'epoca avevano inizio anche nell'Europa occidentale cambiamenti di carattere politico. Il piano Marshall per gli aiuti da parte degli Stati Uniti si stava esaurendo, il flusso degli aiuti militari americani stava diminuendo mentre le economie dell'Europa occidentale si stavano rimettendo in piedi. I paesi occidentali europei sfruttavano la loro maggiore indipendenza per ridurre la complessa lista di prodotti soggetti all'embargo commerciale americano. Al giorno d'oggi, per quanto riguarda l'Europa, ciò che resta della lista delle esportazioni proibite, è piú una seccatura che una seria barriera commerciale.

Sin dal 1954, nella mia veste di segretario per la Commissione degli affari economici per l'Europa, ebbi la possibilità di convocare una riunione di esperti commerciali provenienti da paesi di qua e di là della cortina di ferro. Con la scusa di questa riunione, i rappresentanti dei governi occidentali e orientali s'incontrarono per la prima volta, bilateralmente e multilateralmente, per discutere sulla espansione del commercio. Fra molti paesi di qua e di là della barriera le relazioni economiche erano, a quel tempo, quasi o del tutto nulle. In seguito a queste riunioni e ai negoziati ufficiali che ne seguirono, il commercio aumentò rapidamente, raggiungendo un notevole livello, il quale deve comunque considerarsi « innaturale ».

Cito questo fatto per mettere in evidenza l'importanza decisiva dei fattori politici in relazione ai rapporti commerciali. La documentazione smentisce l'opinione largamente diffusa che un basso livello delle relazioni economiche sia causa di una maggiore tensione politica e il suo corollario che la tensione politica possa venir curata o sostanzialmente mitigata con un semplice aumento del livello commerciale. È stato invece il miglioramento delle relazioni politiche fra i blocchi occidentali e orientali a portare un aumento degli scambi commerciali fra paesi di parte opposta. Senza dubbio, invece, l'aumento degli scambi commerciali ha in qualche modo alleviato la tensione politica. Questa successione ha portato, infatti, ad alcuni negoziati politici costruttivi fra l'ovest e l'est. Non sarò certo io a negare l'effetto positivo che le relazioni commerciali hanno su quelle politiche; nella mia vita di lavoro, in vari periodi, la mia principale occupazione è stata quella di perseguire questo fine. Tuttavia, le influenze economiche restano un fattore di minore importanza nel mondo politicamente diviso di oggi. L'opposizione a questo concetto viene principalmente dalla sfera politica.

Il recente declino nell'impegno assunto dalla maggioranza dei paesi ricchi per gli aiuti all'estero è riportato in questo grafico che traccia il flusso della « assistenza ufficiale allo sviluppo » come percentuale del prodotto lordo nazionale della nazione. La « assistenza ufficiale allo sviluppo » viene determinata dal Comitato di assistenza allo sviluppo dell'OCED. Il compilatore dei dati usati per fare questo grafico, si basa su: « la portata degli aiuti ai paesi meno sviluppati e alle istituzioni multilaterali contemplate dalle forze ufficiali, stati e governi locali inclusi, segue i criteri seguenti: (a) vengono amministrati allo scopo fondamentale di promuovere lo sviluppo economico, e (b) sono destinati a essere delle concessioni ». Le cifre per l'assistenza ufficiale allo sviluppo sono nette. La media distributiva degli aiuti apportati dalle sedici nazioni del DAC segue da vicino la stessa curva degli Stati Uniti per tutti gli anni recenti. In ovvia antitesi, l'impegno assunto dalla Svezia nel fornire aiuti all'estero è aumentato rapidamente come si può vedere dalla percentuale del sondaggio nazionale Gallup dello stesso periodo. La « strategia dello sviluppo internazionale del secondo decennio di sviluppo delle Nazioni Unite », adottata dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite nell'ottobre del 1970, dichiara che « ogni paese economicamente progredito aumenterà progressivamente la sua assistenza ufficiale per lo sviluppo dei paesi in fase di progresso e farà del suo meglio per arrivare a un minimo ammontare netto dello 0,7 per cento del suo prodotto nazionale lordo al prezzo di mercato alla metà del decennio ». L'effettivo adempimento delle direttive delle Nazioni Unite è ancora piú scarso di quanto il grafico mostri.

Il programa per lo sviluppo economico dei paesi poveri e per la distribuzione di aiuti sostanziosi da parte dei paesi ricchi presenta gli stessi problemi in un quadro di maggiori dimensioni e probabilmente con delle conseguenze piú importanti per il destino dell'umanità. Nei primi stadi dello sviluppo della politica del benessere nelle nazioni occidentali ricche si diceva che l'assistenza ai poveri costituiva una specie di assicurazione contro la rivolta dal basso. Ora si dice che l'aiuto portato ai paesi sottosviluppati è nell'interesse dei paesi ricchi. Su questo argomento, quasi tutte le dichiarazioni rilasciate da statisti, da giornalisti e anche, mi dispiace aggiungerlo, da economisti, contengono la superficiale affermazione che i paesi poveri vanno aiutati per preservare la pace mondiale. La premessa non esplicita di questa affermazione risiede nel convincimento che un giusto progresso dello sviluppo economico porterà i paesi sottosviluppati e i loro governi a una coesistenza piú pacifica con le nazioni ricche mentre, in caso contrario, essi si dimostreranno scontenti e ribelli. Questa logica, non affatto confermata, è propria di quella gente che è ricca e pensa come si comporterebbe e agirebbe se fosse povera e intravedesse una speranza (oppure nessuna speranza) di miglioramento. I fatti in nostro possesso non sostengono tale tesi. Genericamente parlando si può sostenere che la gente diventa irrequieta e ribelle quando si accorge che la sua condizione materiale sta migliorando, ma non abbastanza rapidamente. Infatti alcuni teorici hanno presentato questa teoria basata su testimonianze precise. Essi l'hanno considerata valida per la tensione razziale manifestatasi a Detroit o Newark, per il « confronto » di Sukarno con la Malesia e per le guerre e ribellioni avvenute in tutto il mondo. Come altre teorie basate su di un solo fattore, la sua caratteristica è quella di uno studio non sufficientemente critico dei fatti empirici.

Un'altra teoria, anch'essa non convalidata da prove, ma usata per convincere i politici dell'importanza degli aiuti all'estero, sostiene che un paese sottosviluppato diverrà piú « democratico » se avrà un qualche progresso economico. È certo una questione dubbia cosa possa significare la democrazia in paesi largamente illetterati, dove la massa della gente è apatica, ignora i propri interessi e ancor meno è pronta a ricercarli o proteggerli. Né vi è alcuna evidenza empirica per l'assioma che la « democrazia » dipende o è una conseguenza del progresso economico. L'altra opinione, che la democrazia sia una condizione favorevole alla pace fra le nazioni, è chiaramente sbagliata: nei paesi sviluppati, dove si può dire con maggior ragione che la democrazia abbia un significato piú profondo, la storia dimostra che i cittadini sono spesso piú bellicosi dei loro governi.

Dietro tutta questa farragine di teorie sulle reazioni politiche alla realtà economica della povertà, esiste l'idea corrente della « rivoluzione delle nuove speranze ». Alla base di tutto, sebbene l'idea venga sostenuta dai piú illustri personaggi del mondo occidentale, ci si accorge che questa non è che una versione, maggiormente elaborata, della teoria di Marx sulle conseguenze politiche dell'impoverimento dei lavoratori. Secondo questa teoria, il reale impoverimento non è un requisito indispensabile alla rivoluzione; è sufficiente che non si realizzino le prospettive di miglioramento. Lo stesso Marx, nell'elaborazione della sua teoria, fu attento a escluderne il *Lumpenproletariat*, cioè le masse ignoranti e apolitiche. Tralasciando Marx, nessuna seria e onesta ricerca ha mai sostenuto questa teoria, perché appartiene alla categoria delle affermazioni fatte da gente ricca – che può far parte di paesi ricchi come di quelli poveri – sul comportamento che adotterebbe se fosse povera come i poveri dei paesi poveri.

Il concetto, però, della rivoluzione delle nuove speranze si applica, nei paesi poveri, solamente alla mentalità e al comportamento politico dell'alta e media borghesia. Quando questa teoria viene espressa nel corso delle conferenze internazionali può essere anche sincera, poiché chi la espone esprime il modo di sentire e di vedere suo proprio e della sua nazione. I paesi poveri, indipendentemente sia dal fatto che le loro costituzioni stabiliscano il suffragio universale, sia dai principi piú autoritari del potere, sono governati dalle alleanze mutevoli che avvengono ai livelli sociali piú alti. Ciò che questa gente quindi ha da dire, rappresenta, in certo qual modo, il comportamento politico e militare dei loro paesi nelle relazioni internazionali. Ma due domande rimangono ancora senza risposta: sino a che punto queste oligarchie sono spinte dal progresso economico di cui loro, forse, sentono personalmente l'effetto in confronto al livello in cui questo stesso progresso può venir condiviso dalla massa rurale e urbana del loro paese? E quale particolare livello di progresso economico è necessario per soddisfare le loro aspettative, mantenendole cosí tranquille?

In definitiva, le teorie, ora cosí in auge, basate sulla correlazione fra progresso economico e pace, mancano di obiettività e non possono essere di valida guida per la soluzione dei problemi inerenti alla pace e alla guerra fra nazioni o di quelli della pace sociale e della rivoluzione all'interno delle nazioni stesse. Tutto ciò non significa che io non consideri urgente il problema di preservare la pace nel mondo, né intendo suggerire l'idea che i paesi ricchi non abbiano una parte di grande responsabilità nell'essere i promotori dello sviluppo economico del mondo sottosviluppato.

L'attuale situazione mondiale è caratterizzata, da una parte, da una pace instabile fra i paesi civili. Questo stato di cose è mantenuto tale dalla bilancia del terrore fra le due potenze maggiori. Una guerra non può piú essere vinta completamente né dall'una né dall'altra. Dal loro canto, le potenze minori non osano arrischiare una guerra fra di loro né tanto meno con una delle due nazioni piú forti. Molti dei paesi civili piú deboli e piú piccoli si sono resi conto di questa situazione, divenendo politicamente e militarmente alleati degli Stati Uniti o della Russia. Vi sono certamente degli elementi di grande incertezza in questa bilancia del terrore. L'incessante e rapido aumento delle spese per gli armamenti sta minacciando l'economia mondiale; ha distrutto, per esempio, i piani monetari e commerciali dell'occidente stabiliti alla fine della seconda guerra mondiale. Per ora comunque fra i paesi civili predomina la pace.

Dall'altra parte, il mondo sottosviluppato presenta un panorama contrastante di inquietudine e di rivoluzioni interne, di guerre o di pericolo di guerre fra le nazioni. Questo aspetto cosí contrastante fra i ricchi e i poveri è dei piú sinistri. È un appello a portare la pace alla grande maggioranza dell'umanità che vive nei paesi sottosviluppati. Questo appello non è stato raccolto. Al contrario, le nazioni ricche (o meglio alcune di esse) hanno

La struttura dei programmi ufficiali per l'assistenza allo sviluppo varia considerevolmente. Come è dimostrato in questo diagramma, la proporzione percentuale dei contributi multilaterali (*in colore*) in rapporto alle sovvenzioni e ai prestiti (*in grigio*) è considerevolmente più alta per la Svezia che per gli Stati Uniti o per la maggior parte dei paesi del DAC. Le statistiche sono state compilate a cura del DAC per il 1970.

fomentato l'agitazione e il disordine.

Ai tempi degli imperi coloniali i paesi colonizzatori mantenevano, senza alcun dubbio, la pace nelle loro colonie. Tuttavia essi hanno lasciato degli strascichi di conflitti potenziali, creatisi a causa dello sfruttamento delle divisioni etniche e religiose dei paesi a loro soggetti. Ne consegue che spesso le relazioni economiche fra paesi che furono colonie riflettono l'isolamento prodotto dalla politica coloniale, che li voleva assoggettati economicamente e culturalmente alle loro madri patrie. Nelle relazioni economiche fra i paesi ricchi e quelli poveri esistono ancora delle forti correnti di neocolonialismo. Alcuni paesi che furono delle colonie sono oggi degli stati clienti dei loro vecchi o, per alcuni, nuovi padroni; i loro governi mantengono intatti gli antichi rapporti di dipendenza economica.

Alcune fra le madri patrie, per esempio la Francia e i Paesi Bassi, tentarono di mantenere il loro dominio, nel periodo del dopoguerra, conducendo delle sanguinose guerre coloniali. Gli Stati Uniti sono subentrati alla Francia nella guerra in Vietnam e hanno portato il loro intervento militare anche in tutta l'Indocina. Gli Stati Uniti, in questa guerra, hanno fatto uso di mezzi considerati proibiti dalla maggioranza degli appartenenti alle Nazioni Unite e che essi stessi, ciò che è molto significativo, non userebbero in una guerra contro un'altra nazione civile.

Il mondo sottosviluppato è ovunque diviso da questo avventato perseguimento degli scopi politici e strategici condotto dalle potenze piú forti e dai loro alleati. Questi due blocchi di alleanze formano un ostacolo a ogni possibile collaborazione fra i paesi sottosviluppati. La maggior parte degli aiuti delle nazioni ricche a quelle povere è servita a formare un sistema di paesi satelliti. Quelli poveri sono stati incoraggiati a investire le loro risorse nell'acquisto di materiale bellico e hanno ricevuto armi come aiuto militare. Anche quei paesi sottosviluppati che cercano la neutralità tendono ad accettare l'aiuto militare ed economico elargito spesso da ambedue le parti. Da un'inchiesta condotta dall'Istituto di ricerca per la pace internazionale di Stoccolma (SIPRI), sappiamo che l'ammontare degli armamenti esportati dai paesi ricchi verso quelli poveri è arrivato all'incredibile totale di 17,4 miliardi di dollari per gli anni successivi alla fine della seconda guerra mondiale; di questi, due terzi provengono dagli Stati Uniti (7,7 miliardi di dollari) e dalla Russia (4 miliardi). Mi spiace dire che anche la Svezia ha contribuito con 80 milioni, sebbene essa non dia armi e abbia una legislazione molto restrittiva in grado di controllare le condizioni e la politica del paese importatore.

Le nazioni sottosviluppate sono state di fatto le pedine nel gioco della guerra fredda. Il maggior peso di quel conflitto grava ora su di loro, perché le due grandi potenze e i loro alleati trovano che sia piú sicuro continuare il conflitto nel terzo mondo. Non solo hanno permesso che vi potesse essere guerra aperta, ma l'hanno addirittura promossa. Il conflitto nel medio oriente è divenuto, cosí, una guerra per procura combattuta dalle due grandi potenze, mentre le altre nazioni che fanno parte del Consiglio di sicurezza delle Nazioni Unite hanno assunto un ruolo ambiguo. Il principale interesse comune nel proteggere questo conflitto è quello di evitare che sfoci in un diretto confronto fra Stati Uniti e Unione Sovietica. Si sa inoltre che la tragica guerra civile in Nigeria è stata combattuta con armi date o vendute dalla Gran Bretagna e dalla Russia da un lato e dalla Francia dall'altro. La grossa strage avvenuta nel Pakistan orientale prima della recente guerra è stata condotta con le armi fornite in gran parte al governo pakistano dagli Stati Uniti; l'intervento indiano fu condotto con le armi fornite dalla Russia e protetto dal nuovo trattato fra l'India e la Russia.

Fu per prevenire e arrestare questo tipo di guerra che venne creato il Consiglio di sicurezza delle Nazioni Unite. L'assoggettamento di questo organo all'accordo fra le due maggiori potenze è stato confermato sia in senso positivo che in senso negativo nell'acceso e lungo conflitto fra India e Pakistan: positivamente, nella guerra fra i due paesi nel 1965, quando le due potenze maggiori poterono mettersi d'accordo; negativamente, nel conflitto dell'anno scorso, quando queste ultime non trovarono il modo di accordarsi.

Se questa breve rassegna di come iniziano le guerre nel mondo sottosviluppato è in qualche modo corretta, risulta evidente come le cause siano di carattere politico. Nessuna misura economica, incluso l'aiuto necessario a stimolare lo sviluppo, può arrivare alle radici di quelle cause, perché esse sono al di fuori delle relazioni fra le nazioni sottosviluppate. Se le nazioni ricche potessero trovare un accordo nel non fornire aiuti per fomentare e aiutare le guerre civili e qualunque altro tipo di guerra nel terzo mondo, e usassero invece la propria influenza per scoraggiare i conflitti fra le nazioni povere, allora si potrebbe affermare che le misure economiche possono salvaguardare la pace nel mondo. Un simile cambiamento di politica, però, dovrebbe basarsi su un cambiamento di atteggiamento nel modo in cui le due piú grandi potenze e i loro alleati sfruttano i paesi sottosviluppati ai fini dei loro conflitti politici. Se fosse possibile un tale cambiamento, allora sarebbero possibili molte altre misure politiche atte a mantenere la pace. Queste sono previste nei capitoli dello statuto delle Nazioni Unite che riguardano il funzionamento del Consiglio di sicurezza.

Tutto ciò che è stato scritto sullo sviluppo dei paesi poveri ha un carattere fortemente pregiudiziale. In gran parte è semi-ufficiale e non è il caso di farne oggetto di un esame approfondito; è sufficiente dire che è opportunistico; se le ultraottimistiche teorie che pervadono tutti gli scritti fossero corrette, l'aiuto effettivo sarebbe un affare vantaggioso per i paesi ricchi, e le oligarchie che comandano nei paesi sottosviluppati potrebbero sperare nello sviluppo dei loro paesi senza doversi preoccupare degli svantaggi e dei rischi che le riforme interne, altrimenti inevitabili, normalmente comportano.

Una rettifica di questa posizione, sia nella ricerca teorica che in quella pratica, è necessaria per due ragioni. Per prima cosa gli scritti che trattano questi problemi economici dovrebbero valutare la verità come normale livello di ricerca scientifica. In secondo luogo, bisogna che la verità venga conosciuta se si vuole far capire ai cittadini delle nazioni ricche l'urgente necessità di sacrifici da parte loro per provvedere agli aiuti necessari ai paesi poveri e, inoltre, per aiutare con la verità le forze libere dei paesi poveri che stanno battendosi, con scarse probabilità di successo, per le riforme del loro paese. Le statistiche sugli aiuti apportati sono state falsificate in modo scandaloso per dimostrare che l'aiuto è stato maggiore di quanto lo sia stato in effetti. Ne risulta che nella opinione pubblica dei paesi donatori non è mai stata istillata la motivazione necessaria a fornire aiuto in modo sostanziale e effettivo. Oggigiorno questo flusso di aiuti sta diminuendo in termini reali. La loro natura sta degenerando, mentre i prestiti stanno prendendo il posto delle donazioni e il flusso è legato sempre piú alle merci di esportazione del paese « donatore ».

Nel richiedere gli aiuti ai cittadini si fa appello a motivazioni sbagliate. Dico questo non solo per la errata teoria sul come mantenere la pace di cui ho parlato prima a lungo, ma anche per le argomentazioni pratiche che hanno riscontro ad alcuni livelli. Quando l'aiuto è giustificato per essere « negli interessi degli Stati Uniti » questi interessi, se specificati, risultano dei vantaggi politici, strategici e militari. I cittadini americani vengono indotti ad apprezzare le prospettive commerciali mentre i francesi vengono convinti dalla prospettiva di continuare la dominazione culturale della Francia sulle sue ex colonie.

La prima spiegazione sul declino degli aiuti da parte degli Stati Uniti e di altri risiede nella convinzione che gli argomenti base apportati non attraggono e non vengono creduti dalla maggioranza del corpo elettorale. Il corso disastroso della politica diplomatica e militare perseguita dagli Stati Uniti nei paesi sottosviluppati dell'Asia e dell'America Latina ha confermato i peggiori timori del popolo americano. Di conseguenza, come era da aspettarsi, l'America ha notevolmente ridotto i suoi impegni di aiuto all'estero.

In Svezia, invece, proprio per quelle ragioni che appoggiano la mia spiegazione, sta succedendo tutto il contrario. In questa piccola nazione, che da piú di un secolo oramai non ha piú colonie, si è impiegato molto tempo a riconoscere la necessità di apportare aiuto ai paesi sottosviluppati. Da vari anni, però, i contributi a tale scopo sono aumentati annualmente del 25 per cento. La stessa cosa sta avvenendo o può essere prevista in altri piccoli paesi.

Nel programma svedese di aiuti non vi è alcuna delle solite motivazioni che cosí spesso vengono fatte presenti in altre nazioni. Se non altro per ragioni geografiche, è difficile, o forse impossibile, convincere gli svedesi a temere un assalto da parte delle nazioni piú povere nel caso in cui a queste venissero a mancare gli aiuti promessi. La Svezia non partecipa alla guerra fredda; gli svedesi, quindi non hanno ragioni valide per sottrarre i paesi sottosviluppati al potere comunista. E ancor meno essi si propongono di diffondere la loro lingua o la loro cultura. Antiche tradizioni di libero commercio impediscono agli svedesi, conservatori sotto questo punto di vista, di ricavare vantaggi commerciali dagli aiuti elargiti. Ne risulta che la Svezia non collega la portata degli aiuti alla sua esportazione, cosa invece che ha fatto quasi ogni altro paese.

In Svezia, quindi, la sola motivazione che può venir presentata validamente alla gente è quella della solidarietà umana e della compassione. Nel dire questo, riconosco di fare uno spiacevole paragone fra la Svezia e gli Stati Uniti. Tuttavia non voglio dimostrare che gli svedesi siano diversi, da questo punto di vista, dagli americani o dagli abitanti di altre nazioni ricche; voglio solo chiarire la mia tesi centrale. Sia come moralista che come studioso di problemi sociali, sono fermamente convinto che l'argomento morale è il solo a essere valido. Se per quanto concerne gli aiuti alle nazioni povere la tendenza generale alla diminuzione deve venir invertita occorre sostenere l'argomento morale. Questo, proposto con onestà e con onestà rispettato nel quadro attuale del programma di assistenza, avrà tra gli americani lo stesso successo che ha tra gli svedesi.

In Svezia, a dire il vero, il progresso continuo e felice del *welfare state* all'interno ha notevolmente favorito lo sviluppo per quanto riguarda la politica estera. Da tempo nessuno in Svezia sostiene che l'assistenza ai poveri costituisce una forma di « assicurazione » per i piú ricchi. Per di piú, in Svezia, essendo ridotto a una sempre piú piccola minoranza il numero dei veramente bisognosi, è piú difficile che negli Stati Uniti sostenere, per esempio, che il primo dovere verso il prossimo è la propria famiglia e che ogni forma di assistenza dovrebbe essere limitata entro i confini nazionali.

La giustificazione morale ha un identico significato per i paesi sottosviluppati che ricevono gli aiuti: un significato che è cruciale per lo sviluppo di questi paesi. Fino a che essi saranno governati da ricche oligarchie, fino a che vi saranno tra loro delle sempre maggiori ineguaglianze, fino a che la riforma terriera rimarrà una impostura e l'istruzione una struttura antidemocratica e, quindi, antievolutiva nei suoi effetti, sarà difficile sostenere l'importanza degli aiuti sulla base dei motivi della solidarietà umana e della compassione. L'uomo della strada si chiederà: « Perché non tassano i loro ricchi e non riformano i loro paesi prima di venire a chiedere l'elemosina a noi? ».

Nessuna assistenza può essere moralmente neutrale. Almeno questo abbiamo imparato dalla storia degli aiuti economici forniti dalle due maggiori potenze e dai loro alleati. Se la portata degli aiuti deve venire aumentata considerevolmente in futuro, è necessario stabilire delle condizioni di carattere morale e politico sul suo uso da parte del paese ricevente. Una preferenza dovrà venir accordata a quei paesi sottosviluppati che facciano riforme interne. Se altri paesi verranno aiutati, questo dovrà esser fatto a condizioni che richiedono una maggior parità nel condividere i sacrifici e i benefici dello sviluppo economico. Nei piani svedesi per gli aiuti queste regole sono state formulate in modo esplicito, sebbene non siano ancora state applicate radicalmente. Esse sono state esposte in questo articolo poiché non solo sono essenziali per la ripresa degli aiuti da parte delle nazioni ricche, ma anche nell'interesse dei paesi poveri per un loro rapido e stabile sviluppo economico.

Il linguaggio e il cervello

Le afasie sono disturbi del linguaggio causati da lesioni cerebrali. I rapporti fra questi disturbi e certe particolari lesioni cerebrali suggeriscono un modello di organizzazione delle zone del linguaggio nel cervello umano

di Norman Geschwind

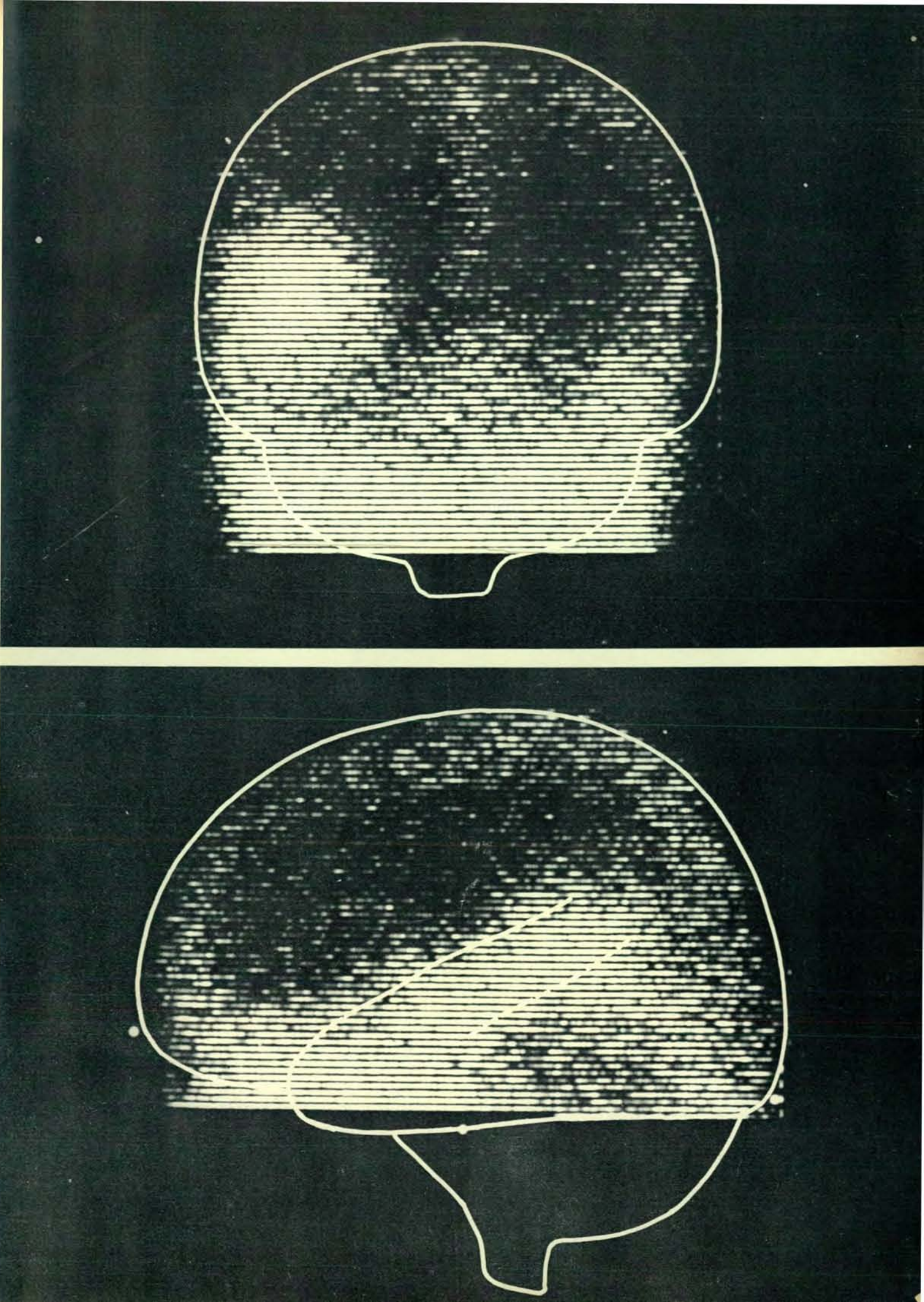
Praticamente tutto ciò che sappiamo sul modo in cui le funzioni del linguaggio sono organizzate nel cervello umano l'abbiamo imparato da condizioni patologiche o in circostanze anormali: le lesioni cerebrali, la chirurgia cerebrale, la stimolazione elettrica di cervelli scoperti durante le operazioni chirurgiche e gli effetti dei farmaci sul cervello. Fra queste fonti d'informazione la piú feconda è stata lo studio dei disturbi del linguaggio seguito da esame del cervello post-mortem in pazienti che avevano sofferto di lesioni cerebrali. Da questi studi è emerso un modello delle interconnessioni fra le diverse zone del linguaggio e delle funzioni di ogni singola zona.

Il disturbo del linguaggio dovuto a danno cerebrale è chiamato afasia. Si tratta di disturbi tutt'altro che rari. L'afasia è una comune conseguenza dell'ostruzione o della rottura di un vaso sanguigno nel cervello, fatto questo che in ordine di importanza costituisce la terza causa di decesso negli Stati Uniti. Anche se la perdita del linguaggio da lesione cerebrale era stata descritta occasionalmente prima del XIX secolo, la ricerca medica in questo campo fu iniziata da un grande studioso francese, Paul Broca, che nel 1861 pubblicò il primo di una serie di saggi sul linguaggio e sul cervello. Broca per primo evidenziò che il danno subito da una particolare zona del cervello produce disturbi nell'emissione del linguaggio. La zona da lui identificata, situata nella terza circonvoluzione frontale della corteccia cerebrale, è ora chiamata area di Broca (*si veda l'illustrazione a pagina 20*).

L'area di Broca si trova immediatamente davanti a quella parte della corteccia motoria che controlla i muscoli facciali, la mascella, la lingua, il palato e la laringe, in altri termini i muscoli impegnati nella produzione del linguaggio. Questa regione viene spesso chiamata « area facciale motoria ». Potrebbe perciò sembrare che la perdita del linguaggio conseguente a lesione dell'area di Broca dipenda dalla paralisi di questi muscoli. Tuttavia non è questa la spiegazione corretta. Una lesione che colpisca direttamente la zona che controlla tali muscoli produce spesso solo una lieve debolezza dei muscoli facciali inferiori dal lato opposto alla zona danneggiata e non produce un indebolimento permanente della mascella, della lingua, del palato o delle corde vocali. Ciò dipende dal fatto che la maggior parte di questi muscoli può essere controllata da entrambi gli emisferi cerebrali. Una lesione dell'area facciale motoria in un emisfero cerebrale può essere compensata dal centro di controllo situato nell'emisfero opposto. Broca definí « afemia » il disturbo del linguaggio prodotto da una lesione, ma questo termine ben presto fu sostituito da « afasia », un termine proposto da Armand Trousseau.

Nel 1865 Broca forní un secondo importante contributo allo studio del linguaggio e del cervello. Riferí che un danno subito da certe zone specifiche dell'emisfero sinistro produceva disturbi del linguaggio parlato, mentre la distruzione delle zone corrispondenti nell'emisfero destro non produceva alcuna alterazione del liguaggio. Broca trasse questa conclusione studiando otto casi consecutivi di afasia, e la sua tesi è stata ampiamente confermata nei cento anni successivi alle sue ricerche. Solo raramente un danno subito dall'emisfero destro produce disturbi del liguaggio: su 100 persone con disturbi permanenti del liguaggio dovuti a lesioni cerebrali circa 97 presentano una lesione all'emisfero sinistro. Il controllo di certe funzioni da parte di un solo emisfero è chiamato « dominanza cerebrale ». Per quanto ne sappiamo, l'uomo è l'unico mammifero in cui un comportamento appreso è controllato da una sola metà del cervello. Fernando Nottebohm dell'Università Rockefeller ha riscontrato un controllo neurale unilaterale anche nel canto degli uccelli. È interessante osservare che una persona colpita da afasia di Broca, che tutt'al piú riesce a biascicare una o due parole, può esser capace di cantare una melodia in modo rapido, corretto e perfino elegante. Questa è una nuova conferma del fatto che l'afasia non deriva da una paralisi muscolare.

Nel decennio che seguí il primo resoconto di Broca sul rapporto fra lesioni cerebrali e linguaggio comparvero numerosissimi saggi sulle afasie tipo Broca. Anzi si tendeva a credere che tutte le afasie dipendessero da lesioni dell'area di Broca. A questo punto entrò in scena un altro grande pioniere dello studio del cervello. A differenza di Broca, che all'epoca del suo primo saggio sull'afasia era già abbastanza noto, Carl Wernicke era uno sconosciuto e non aveva pubblicato nulla in precedenza; aveva solo 26 anni ed era un giovane assistente nel Reparto di neurologia di Bratislava. Pur essendo

La localizzazione di certe lesioni cerebrali si può determinare iniettando nella circolazione sanguigna un isotopo radioattivo del mercurio, che viene assorbito dai tessuti cerebrali lesi. La regione che ha subito una lesione viene identificata vagliando le diverse zone alla ricerca di quelle con radioattività piú alta. Nella figura in alto l'esame è stato compiuto in posizione postero-anteriore; la zona bianca a sinistra mostra che la lesione è localizzata nell'emisfero sinistro. La figura in basso, che presenta la parte sinistra, mostra che la zona che assorbiva maggiormente il mercurio è situata prevalentemente nella prima circonvoluzione temporale, il che indica un danno al centro del linguaggio di Wernicke per occlusione dei vasi sanguigni. Questi esami sono stati compiuti da David Patten e Martin Albert del Boston Veterans Administration Hospital.

egli giovane e sconosciuto, il suo saggio sull'afasia, pubblicato nel 1874, s'impose subito all'attenzione. Wernicke descrisse la lesione di una zona dell'emisfero sinistro non situata nell'area di Broca, lesione che produce un disturbo del linguaggio diverso dall'afasia di Broca.

Nell'afasia di Broca l'eloquio è lento e faticoso, l'articolazione è imperfetta, e c'è una caratteristica omissione di certe piccole voci grammaticali e delle desinenze dei nomi e dei verbi, in modo che il discorso assume uno stile telegrafico. Se gli si chiede di descrivere un viaggio che ha fatto, il paziente per esempio risponde: « New York ». Se si insiste perché produca una frase, può non riuscire a dir nulla piú che: « Andato... New York ». Questa difficoltà non è dovuta semplicemente al desiderio di risparmiare uno sforzo, come hanno supposto alcuni. Anche quando il paziente fa del suo meglio per collaborare a ripetere le parole, si inceppa di fronte a certe forme grammaticali e a certe frasi. Per esempio gli è piú difficile dire: « se egli fosse qui, io andrei » che non « il generale comanda l'esercito ».

L'afasia descritta da Wernicke è del tutto diversa. Il paziente può riuscire a parlare molto rapidamente, con giusto ritmo, correttezza grammaticale e articolazione perfetta. Se non lo si ascolta attentamente il suo eloquio può sembrare quasi normale. Per esempio il paziente può dire: « Prima di stare in questa casa, stavo in quell'altra. Mia sorella aveva l'appartamento nell'altra casa ». Il suo discorso però è anormale in quanto è spiccatamente privo di contenuto. Il paziente non riesce a usare la parola corretta e la sostituisce con circonlocuzioni (« quello che si usa per tagliare » invece di « coltello ») e con termini generici (« cosa »). Soffre anche di parafasia, che può essere di due tipi. La parafasia verbale consiste nel sostituire una parola o frase al posto di un'altra, a volte con significato affine (« coltello » invece di « forchetta »), a volte senza affinità (« martello » al posto di « carta »). La parafasia letterale o fonemica consiste invece nella sostituzione di suoni scorretti al posto di quelli giusti in parole per il resto corrette (« lebra » al posto di « zebra »). Se una parola contiene piú suoni scorretti, diviene un neologismo, per esempio « canita » al posto di « matita ».

Wernicke osservò anche un'altra differenza fra questi pazienti afasici e quelli colpiti da afasia di Broca. Un individuo colpito da afasia di Broca può presentare una comprensione essenzialmente normale del linguaggio. Anzi secondo Broca nessuna lesione cerebrale poteva da sola causare la perdita della comprensione. Invece si sbagliava: una lesione del centro di Wernicke può produrre una grave perdita della comprensione, anche se resta del tutto integra la capacità di udire i suoni non verbali e la musica.

Forse il contributo piú importante di Wernicke è il suo modello della connessione fra le diverse aree cerebrali che presiedono al linguaggio. Wernicke affermò modestamente che le sue idee si fondavano sugli insegnamenti di Theodor Meynert, un neuroanatomista viennese che aveva cercato di correlare la struttura del sistema nervoso col suo funzionamento. Poiché l'area di Broca era adiacente alla regione della corteccia cerebrale che controlla i muscoli del linguaggio, Wernicke suppose che l'area di Broca contenesse i programmi della complessa coordinazione di tali muscoli. Inoltre l'area di Wernicke è adiacente alla regione corticale che riceve gli stimoli auditivi (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Wernicke perciò fu naturalmente indotto a supporre che ci fosse una connessione fra l'area di Broca e la sua. Oggi sappiamo che le due aree sono effettivamente connesse da un fascio di fibre nervose chiamato fascicolo arcuato. Si può supporre che, quando dobbiamo ripetere una parola udita, gli stimoli auditivi passino dall'area di Wernicke all'area di Broca.

Si ritiene che nel cervello umano le zone primarie del linguaggio siano situate nell'emisfero sinistro, perché solo raramente una lesione all'emisfero destro provoca disturbi del linguaggio. L'area di Broca, adiacente alla regione della corteccia motoria che controlla il movimento dei muscoli delle labbra, della mascella, della lingua, del palato molle e delle corde vocali, a quanto sembra contiene i programmi per il coordinamento di questi muscoli nel linguaggio. Un danno all'area di Broca provoca un'articolazione lenta e faticosa del linguaggio, mentre la comprensione del linguaggio rimane intatta. L'area di Wernicke è situata fra la circonvoluzione di Heschl, la stazione che riceve originariamente gli stimoli auditivi, e la circonvoluzione angolare, che funge da stazione intermedia fra le regioni auditive e quelle visive. Quando è danneggiata l'area di Wernicke il discorso è fluente ma scarso di contenuto, e in genere manca la comprensione. L'area di Wernicke e quella di Broca sono unite da un fascio di nervi chiamato fascicolo arcuato. Quando questo fascicolo è danneggiato il discorso è fluente ma anormale.

L'isolamento dell'area del linguaggio prodotta da un'ampia lesione a forma di *C* produsse una singolare sindrome in una donna che aveva subito un grave avvelenamento da monossido di carbonio: era in grado di ripetere le parole e di imparare canzoni nuove ma non di comprendere il significato delle parole. L'esame necroscopico del suo cervello rivelò che nelle regioni circostanti le zone del linguaggio dell'emisfero sinistro, o la corteccia (*zone colorate*) o la materia bianca sottostante (*zone tratteggiate*) erano state distrutte, mentre rimanevano intatte le strutture corticali connesse alla produzione del linguaggio (area di Broca e area di Wernicke) e le connessioni fra di loro.

La comprensione del linguaggio scritto esige che vi sia una connessione fra le zone con funzione visiva e quelle preposte al linguaggio. Questa funzione è assolta dalla circonvoluzione angolare, una zona della corteccia situata subito dietro l'area di Wernicke, e che in un certo senso serve a trasformare uno stimolo visivo nella forma auditiva appropriata.

Possiamo ora dedurre da tale modello quel che accade nel cervello durante la produzione del linguaggio. Quando viene udita una parola, gli stimoli emessi dalla zona auditiva primaria della corteccia vengono ricevuti dall'area di Wernicke. Se la parola udita dev'essere pronunciata, il modello viene trasmesso dall'area di Wernicke all'area di Broca, dove assume forma articolatoria, e passa poi alla zona motoria che controlla il movimento dei muscoli del linguaggio. Se la parola udita dev'essere scritta, lo stimolo auditivo viene trasmesso alla circonvoluzione angolare, dove attiva lo schema visivo. Quando una parola deve essere letta, gli stimoli provenienti dalle zone visive primarie passano alla circonvoluzione angolare che a sua volta attiva la forma auditiva corrispondente alla parola stessa nell'area di Wernicke. Si deve notare che nella maggior parte delle persone la comprensione di una parola scritta comporta anche l'attivazione della sua forma auditiva nell'area di Wernicke. Secondo Wernicke ciò dipende dal modo in cui la maggior parte delle persone apprende il linguaggio scritto. Però egli pensava che nelle persone nate sorde che in seguito avevano imparato a leggere, l'area di Wernicke non entrasse in attivazione.

Secondo questo modello, se l'area di Wernicke subisce una lesione, la persona incontrerebbe difficoltà a comprendere il linguaggio sia parlato che scritto: dovrebbe essere incapace di parlare, di ripetere parole udite e di scrivere correttamente. Il fatto che in tali casi invece il discorso è fluente e bene articolato fa pensare che l'area di Broca sia intatta ma non riceva informazioni adeguate. Invece una lesione che abbia colpito l'area di Broca, dovrebbe avere come effetto un disturbo dell'articolazione: l'eloquio dovrebbe essere lento e faticoso mentre la comprensione rimarrebbe intatta.

Questo modello, che può sembrare un po' semplice, si è dimostrato molto utile e in base a esso si può ipotizzare la sede delle lesioni cerebrali a seconda del tipo di disturbo del linguaggio. Inoltre questo modello ha permesso di prevedere con notevole precisione che la lesione di certe zone avrebbe dovuto produrre un tipo di afasia non ancora descritto. Per esempio in presenza di una lesione che tagli le comunicazioni fra l'area di Wernicke e l'area di Broca, lasciando però intatte entrambe le aree, si sarebbe dovuto avere un tipo particolare di afasia: essendo intatta l'area di Broca l'eloquio avrebbe dovuto essere fluente ma anormale; d'altro canto la comprensione avrebbe dovuto essere intatta perché l'area di Wernicke funziona normalmente. Avrebbe invece dovuto essere grossolanamente danneggiata la capacità di ripetere il linguaggio parlato. Questa sindrome, che in seguito è stata effettivamente scoperta, viene chiamata afasia di conduzione.

Il modello fondamentale della localizzazione cerebrale del linguaggio è stato confermato dalle ricerche di molti studiosi. Il sovietico A. R. Luria studiò un gran numero di pazienti che avevano subito ferite cerebrali durante la seconda guerra mondiale (si veda l'articolo *L'organizzazione funzionale cerebrale* di A. R. Luria, in « Le Scienze », n. 22, marzo 1970). Quando la lesione era situata al di sopra dell'area di Wernicke o dell'area di Broca, Luria constatò che il paziente quasi sempre presentava un'afasia grave e permanente. Quando le ferite erano situate in altre zone, l'afasia era meno frequente e meno grave.

Un interessante caso di afasia fornì una sorprendente conferma del modello di Wernicke. Il caso, descritto da Fred Quadfasel, Jose Segarra e da me, riguardava una donna che aveva subito un avvelenamento accidentale da monossido di carbonio. Nei nove anni che la studiammo, la donna rimase completamente inabile e totalmente bisognosa di assistenza. Non parlava mai spontaneamente e non dava alcun segno di comprendere le parole. Tuttavia era in grado di ripetere perfettamente delle frasi che le erano

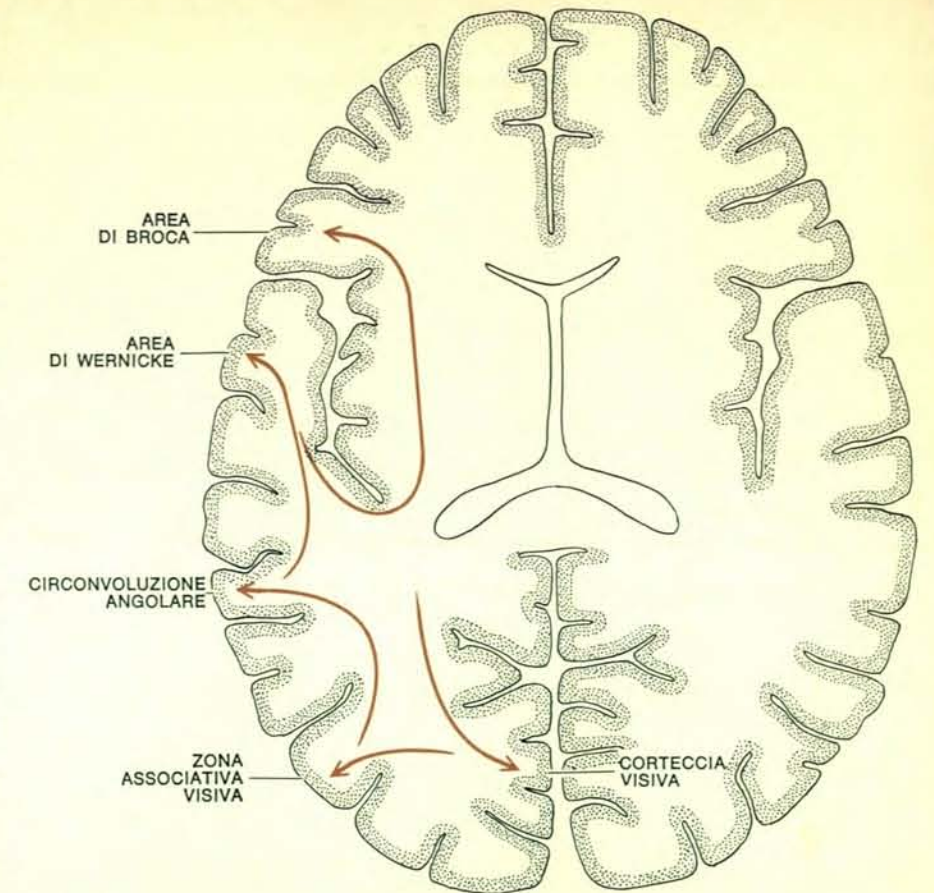
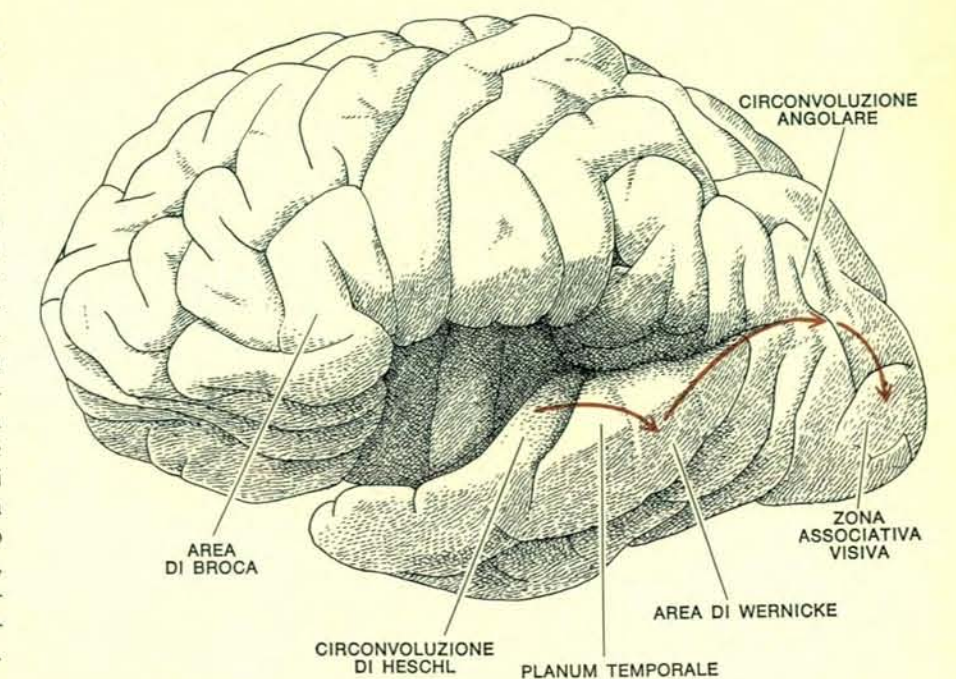
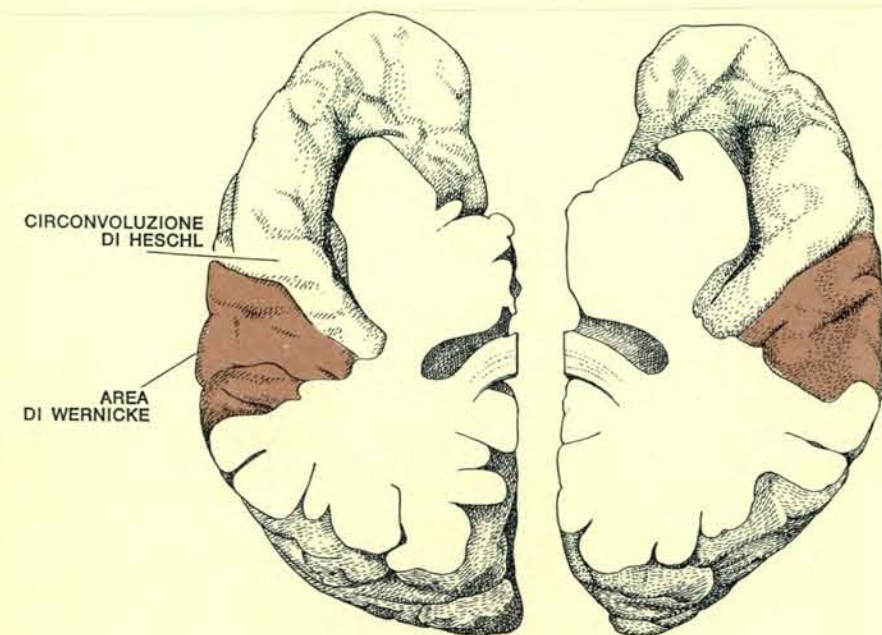
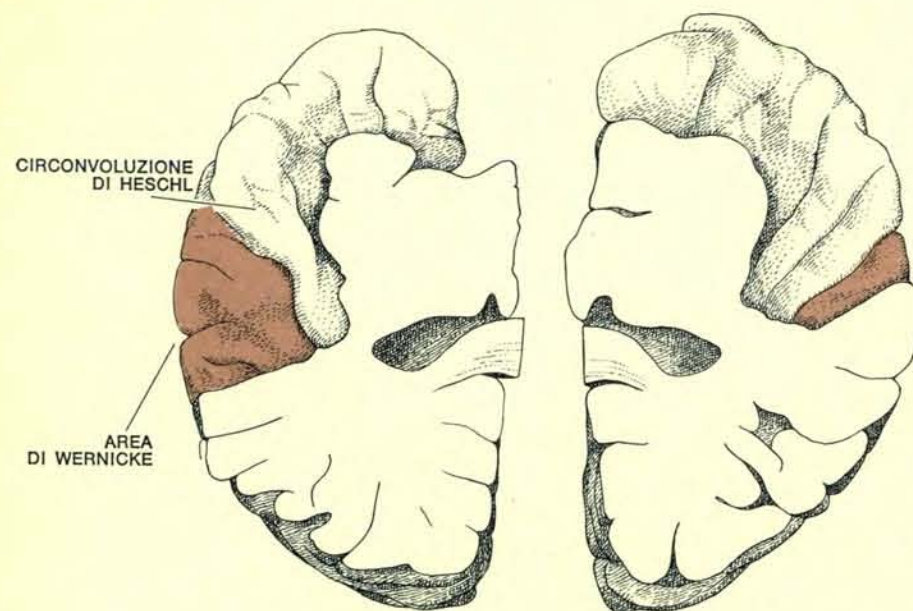
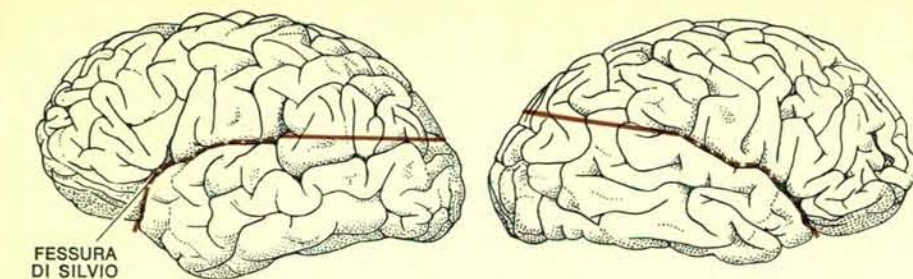
Nel 1892 Joseph Jules Dejerine descrisse il caso classico di un uomo che aveva perso la capacità di leggere pur possedendo un'acuità visiva normale e pur essendo in grado di copiare parole scritte. L'esame necroscopico del suo cervello mostrò che la corteccia visiva sinistra e lo splenio (*zone colorate in scuro*) erano distrutti a causa di un'occlusione dell'arteria cerebrale posteriore. Lo splenio è la parte del corpo calloso che trasferisce le informazioni visive da un emisfero all'altro. La corteccia visiva sinistra del soggetto era inattiva e lo rendeva cieco nel campo visivo destro. Nel campo visivo sinistro la corteccia visiva destra riceveva correttamente le parole ma queste non potevano passare alla zona del linguaggio nell'emisfero sinistro a causa della lesione del chiasma: quindi le parole che vedeva rimanevano per lui degli schemi privi di significato.

appena state enunciate. Inoltre era in grado di completare certe frasi. Per esempio, se le si diceva « le rose sono rosse », ella replicava « le rose sono rosse, le violette sono blu, lo zucchero è dolce, e anche tu sei dolce ». Ancora più sorprendente era la sua capacità di imparare delle canzoni: le si faceva sentire una canzone che era stata scritta dopo che ella si era ammalata e, dopo averla sentita alcune volte, ella cominciava ad associarsi al canto. A volte iniziava a cantare appena cominciava la canzone. Se si interrompeva la canzone dopo alcune battute, ella andava avanti fino alla fine, senza sbagliare mai né le parole né la melodia.

In base al modello di Wernicke supponemmo che le lesioni causate dall'avvelenamento da monossido di carbonio non toccassero la zona del linguaggio e dell'udito, e che l'area di Broca e quella di Wernicke fossero intatte. L'esame necroscopico rivelò una notevole lesione che isolava l'area del linguaggio dal resto della corteccia. Questa lesione confermava le nostre ipotesi: l'area di Broca, l'area di Wernicke e le connessioni fra le due erano intatte; parimenti erano intatte le vie auditive e le vie motorie che portavano agli organi del linguaggio. Tuttavia attorno alla zona del linguaggio erano distrutte o la corteccia o la materia bianca sottostante (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 21*). Questa donna non era in grado di comprendere il linguaggio perché le parole non suscitavano associazioni in altre parti della corteccia. Era in grado di ripetere correttamente delle frasi perché le connessioni interne della zona del linguaggio erano intatte. Pronunciando una frase iniziale, probabilmente si stimolavano sequenze di parole da lei precedentemente bene imparate e accumulate nell'area di Broca. Questa sindrome è chiamata isolamento dell'area del linguaggio.

Un neurologo francese, Joseph Jules Dejerine, propose due importanti ampliamenti del modello di Wernicke. Nel 1891 egli descrisse un disturbo chiamato alessia con agrafia, cioè la perdita delle capacità di leggere e scrivere. Il paziente tuttavia era in grado di parlare e di comprendere il liguaggio parlato. L'esame necroscopico evidenziò una lesione della circonvoluzione angolare dell'emisfero sinistro, l'area del cervello che funge da stazione intermedia fra la regione visiva e quella auditiva. Una lesione in questa zona separa l'area verbo-ottica da quella verbo-acustica: anche se il paziente vede correttamente le parole e le lettere, esse per lui costituiscono dei modelli visivi privi di significato, poiché prima che la parola possa essere compresa il modello visivo deve essere trasformato in modello auditivo. Viceversa lo schema auditivo di una parola deve essere trasformato nello schema visivo prima che la parola possa essere pronunciata. I pazienti che soffrono di alessia con agrafia non sono capaci di riconoscere le parole pronunciate a voce alta e non sono in grado di pronunciare essi stessi a voce alta una parola.

Il secondo contributo di Dejerine fu la dimostrazione dell'importanza del transfer dell'informazione da un emisfero all'altro. Il suo paziente era un intelligente uomo d'affari che un mattino al risveglio aveva scoperto di non essere più capace di leggere. Si scoprì che quest'uomo era cieco nella parte destra del campo visivo. Poiché la parte destra di questo campo è proiettata sull'emisfero cerebrale sinistro, è ovvio che quest'uomo soffriva di un danno alle vie visive dell'emisfero sinistro (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Egli era in grado di parlare, di comprendere il linguaggio parlato e di scrivere ma non riusciva a leggere pur possedendo una normale acuità visiva. In effetti, pur essendo incapace di comprendere le parole scritte, poteva copiarle correttamente. L'esame necroscopico del cervello di quest'uomo rivelò a Dejerine due lesioni derivanti dall'occlusione dell'arteria cerebrale posteriore sinistra: la corteccia visiva dell'emisfero sinistro era totalmente distrutta; parimenti distrutta era una porzione del corpo calloso, cioè della massa di fibre nervose che connettono tra loro i due emisferi cerebrali: la parte distrutta era costituita dallo splenio, che trasporta le informazioni visive da un emisfero all'altro. La distruzione dello splenio impediva agli stimoli provenienti dalla corteccia visiva dell'emisfero destro di raggiungere la circonvoluzione angolare dell'emisfero sinistro. Secondo il modello di Wernicke la circonvoluzione angolare sinistra trasforma lo schema visivo di una parola in schema auditivo, e senza tale trasformazione un individuo non può comprendere una parola che vede scritta. Dopo Dejerine altri studiosi hanno dimostrato che, se una persona è cieca nella parte destra del campo visivo ma è ancora capace di leggere, vuol dire che è intatta la parte del corpo calloso che trasferisce le informazioni visive da un emisfero all'altro.

Nel 1937 John Trescher e Frank Ford riferirono il primo caso in cui una resezione chirurgica del corpo calloso interrompeva il passaggio delle infor-

Secondo il modello di Wernicke la capacità di denominare un oggetto visto implica il passaggio dello schema visivo alla circonvoluzione angolare, che contiene le « regole » per attivare l'area di Wernicke. Da qui la forma auditiva attraverso il fascicolo arcuato raggiunge l'area di Broca. Qui viene attivata la forma articolatoria, che passa alla zona frontale della corteccia motoria che permette l'articolazione della parola.

La comprensione del nome di un oggetto implica il trasferimento degli stimoli auditivi dalla circonvoluzione di Heschl (la corteccia auditiva primaria) all'area di Wernicke e poi alla circonvoluzione angolare, che attiva lo schema visivo corrispondente nella corteccia visiva associativa. Qui è stata allargata la fessura di Silvio per mostrare la via.

Nella superficie superiore del lobo temporale, che non può essere vista in un cervello intatto poiché si trova all'interno della fessura di Silvio, si sono constatate differenze anatomiche fra i due emisferi del cervello umano. La fessura di Silvio sembra nell'emisfero sinistro piú bassa che nell'emisfero destro (*figura in alto*). Per esporre la superficie del lobo temporale si fa passare un coltello lungo la fessura (*linea tratteggiata*) e poi attraverso il cervello, tagliando via la parte superiore (*linea continua*). La regione studiata era il planum temporale (*zone colorate*), in cui si prolunga l'area di Wernicke. La figura in mezzo mostra un cervello con un planum sinistro piú ampio; la figura in basso mostra un planum sinistro e un planum destro circa della stessa misura. Studiando 100 cervelli umani normali si constatò che il planum temporale era piú grande a sinistra nel 65 % dei casi, uguale nei due emisferi nel 24 % dei casi e piú grande a destra nell'11 %.

mazioni da un emisfero all'altro. Al paziente fu tagliata la porzione laterale del corpo calloso durante un intervento mirante a rimuovere un tumore cerebrale. Secondo il modello di Wernicke ciò avrebbe dovuto provocare la perdita della capacità di leggere nella parte sinistra del campo visivo. Trescher e Ford tuttavia constatarono che il paziente era in grado di leggere normalmente quando le parole comparivano nel suo campo visivo destro mentre era del tutto incapace di leggere quando comparivano nel campo visivo sinistro.

Hugo Liepmann, un assistente di Wernicke a Bratislava, studiò approfonditamente le sindromi del corpo calloso, e la descrizione di questi disturbi costituí un importante settore della neurologia tedesca nell'epoca precedente la prima guerra mondiale. La sua opera fu in gran parte trascurata, e solo recentemente è stata apprezzata in tutta la sua importanza. L'analisi di Liepmann delle sindromi del corpo calloso si fondava sul modello di Wernicke. In casi come quello descritto da Liepmann la parte frontale del corpo calloso è distrutta per quattro quinti da un'occlusione dell'arteria cerebrale che la nutre. Poiché però lo splenio rimane intatto il paziente è in grado di leggere in entrambi i campi visivi. Questa lesione produce tuttavia tre disturbi caratteristici: il paziente è in grado di scrivere correttamente con la mano destra ma solo scorrettamente con la sinistra; è capace di eseguire comandi con la mano destra ma non con la sinistra: anche se l'emisfero sinistro è in grado di comprendere l'ordine, non può trasmettere il messaggio all'emisfero destro; infine il paziente non è capace di dominare oggetti che tiene nella mano sinistra perché le sensazioni somestesiche non possono raggiungere i centri verbali dell'emisfero sinistro.

Da quando Broca scoprí la dominanza cerebrale negli esseri umani questo problema ha sempre molto interessato gli studiosi. Mentre molti neurologi della prima era ritennero che fra i due emisferi vi fossero differenze anatomiche, negli ultimi decenni si tendeva a supporre che l'emisfero sinistro e quello destro fossero simmetrici. Si supponeva che la dominanza cerebrale si fondasse su sottili e ignote differenze fisiologiche che non si riflettevano nella struttura grossolana. Walter Levitsky e io decidemmo di esaminare di nuovo la possibilità che il cervello umano fosse anatomicamente asimmetrico; studiando 100 cervelli umani normali constatammo con

	AFASIA DI BROCA				AFASIA DI WERNICKE
SIGNIFICATO	KANA		KANJI		
	SCRITTURA DEI PAZIENTI	SCRITTURA CORRETTA	SCRITTURA DEI PAZIENTI	SCRITTURA CORRETTA	
INCHIOSTRO	キンス (KINSU)	インキ (INKI)	墨 (SUMI)	墨	[illegible] [illegible] [illegible]
UNIVERSITÀ	タイ (TAI)	ダイガク (DAIGAKU)	大學	大學 (GRANDE APPRENDIMENTO)	久 (A LUNGO) 兵 (SOLDATO) [illegible]
TOKIO	トウ (TOU)	トウキヨウ (TOKIO)	東京	東京 (CAPITALE ORIENTALE)	

Gli afasici giapponesi, dato il particolare sistema di scrittura che si usa in Giappone, manifestano alcune caratteristiche che si osservano raramente nei pazienti occidentali. Questo tipo di scrittura comprende due forme distinte: una forma sillabica, il kana, e una forma ideografica, il kanji. Le parole kana sono articolate sillaba per sillaba e non sono facili da identificare a prima vista, mentre ogni carattere kanji rappresenta al tempo stesso un suono e un significato. Un paziente con afasia di Broca studiato da Tsuneo Imura e colleghi alla facoltà di medicina dell'Università di Nihon era in grado di scrivere correttamente una parola che gli veniva dettata in kanji ma non in kana (*in alto a sinistra*). Se si chiedeva al paziente di scrivere la parola « inchiostro », anche se per questa parola non esiste un carattere kanji, egli a primo acchito cercava di usare il carattere kanji « sumi », che significa inchiostro di china. Se gli si chiedeva di scrivere in kana, egli produceva simboli corretti ma parole errate. Un altro paziente con afasia di Wernicke scriveva rapidamente e senza esitazione in kanji, ma non si rendeva conto di produrre ideogrammi privi di significato. Solo due dei caratteri da lui scritti avevano un significato (*in alto a destra*).

sorpresa che vi erano delle asimmetrie assai cospicue e facilmente visibili. Noi studiammo la superficie superiore del lobo temporale, che nel cervello intatto non è visibile perché è posta in fondo alla fessura di Silvio. L'area asimmetrica da noi scoperta e misurata è il planum temporale, un prolungamento dell'area di Wernicke (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Nel 65 % dei casi questa regione era piú ampia a sinistra, nel 24 % era uguale nei due emisferi e nell'11 % era piú ampia a destra. In termini assoluti, il planum sinistro in media era nove millimetri piú lungo del planum destro. In termini relativi, il planum sinistro era di un terzo piú lungo del destro. Statisticamente tutte queste differenze erano altamente significative. Juhn A. Wada dell'Università della Columbia Britannica riferí in seguito una ricerca che confermò i nostri risultati. Inoltre Wada, studiando una serie di cervelli di bambini morti poco dopo la nascita constatò che anche in essi era presente l'asimmetria del planum. Sembra probabile che le asimmetrie del cervello siano geneticamente determinate.

A volte si afferma che l'approccio anatomico trascura la plasticità del sistema nervoso e fa apparire quasi disperate le probabilità di terapia del linguaggio. Questo tuttavia non è vero: anche i primissimi studiosi dell'afasia si resero conto che certi pazienti sviluppavano sintomi molto piú lievi di quanto ci si aspettasse. Altri pazienti si riprendevano completamente da una lesione che normalmente avrebbe prodotto un'afasia permanente. In certi casi c'è un recupero totale o parziale delle funzioni del linguaggio, come ha dimostrato Luria nel suo studio su vasta scala dei feriti di guerra: di tutti i pazienti con ferite nella zona primaria del linguaggio dell'emisfero sinistro, il 97,2 % erano afasici quando Luria li esaminò per la prima volta; una ricerca catamnestica evidenziò in seguito che il 93,3 % erano ancora afasici, ma nella maggior parte dei casi in misura meno grave.

Come si spiega l'apparente recupero della funzione del linguaggio in certi casi? Disponiamo di alcune risposte parziali. È noto che i bambini recuperano molto meglio degli adulti che presentano lo stesso tipo di lesioni. Ciò fa pensare che, per lo meno nell'infanzia, l'emisfero destro abbia una certa capacità di assumere su di sé le funzioni del linguaggio. Alcuni adulti che hanno recuperato avevano subito una lesione cerebrale durante l'infanzia. Numerosi pazienti che hanno subito l'asportazione chirurgica di certe parti della zona del linguaggio al fine di un controllo degli attacchi epilettici spesso manifestavano disturbi del linguaggio piú lievi di quanto ci si aspettasse. Ciò probabilmente dipende dal fatto che i pazienti soffrivano fin dall'infanzia di un'epilessia temporale sinistra che coinvolgeva l'emisfero sinistro e si servivano quindi in misura notevole dell'emisfero destro per esplicare le funzioni relative ai problemi del linguaggio.

Anche i mancini manifestano in media disturbi piú lievi di quanto ci si aspetti se subiscono danni alle regioni del linguaggio, anche se, per quanto riguarda il linguaggio, nella maggior parte dei mancini c'è dominanza dell'emisfero sinistro cosí come accade per i destrimani. È interessante notare che i destrimani che hanno in famiglia una forte incidenza di mancinismo manifestano un migliore recupero del linguaggio delle persone che non presentano un'eredità di mancinismo.

Ora si cominciano a mettere a punto dei metodi efficaci e sicuri per studiare la dominanza cerebrale e la localizzazione della funzione del linguaggio nel cervello umano intatto e normale. Doreen Kimura dell'Università del Western Ontario ha adattato la tecnica dell'ascolto biauricolare allo studio delle asimmetrie acustiche del cervello. Piú di recente diversi ricercatori hanno constatato un aumento dell'attività elettrica nelle zone del linguaggio dell'emisfero sinistro durante la produzione o la percezione del linguaggio. Un perfezionamento di queste tecniche potrà portare a una miglior comprensione dell'organizzazione del cervello umano normale per quanto riguarda il linguaggio. Una piú profonda comprensione dei meccanismi neurali del linguaggio dovrebbe a sua volta portare all'elaborazione di metodi piú precisi per curare i disturbi dell'attributo piú caratteristico dell'uomo, il linguaggio.

La Glomar Challenger, qui sopra ripresa nel mar Tirreno, è finora la sola nave in grado di perforare fondali di oltre 5000 metri di profondità. La torre di trivellazione è alta 43 metri. Alla base della torre vi è la rastrelliera automatica contenente piú di 7 km di tubi. L'anidrite laminata del Miocene superiore (*sotto a sinistra*) carotata nel Bacino balearico indica che 5-6 milioni di anni fa il Mediterraneo, isolato dall'Atlantico, era soggetto a forte evaporazione. Le carote prelevate dal carotiere sono contenute in tubi di plastica sottile che vengono sezionati per il lungo per permettere lo studio dei sedimenti. Le lutiti grigio-verdi (*sotto a destra*), con intercalati letti diatomitici giallastri e intervalli sapropelitici bruno scuri, carotate nella Fossa Ellenica, indicano occasionali episodi di ristagno delle acque di fondo del Mediterraneo orientale durante i periodi di interglaciali di ritiro delle grandi calotte glaciali quaternarie che coprivano l'Europa settentrionale e la zona alpina.

I carotaggi profondi nel Mediterraneo

Le perforazioni profonde effettuate nel Mediterraneo, nel quadro del Deep Sea Drilling Project, hanno gettato nuova luce sulla storia geologica di questo bacino

di Forese Carlo Wezel

L'osservazione di un atlante fisico della regione mediterranea mostra l'esistenza di una doppia serie di catene montuose (*si veda l'illustrazione a pag. 32*). Entrambe partono da Gibilterra, attraversano l'Europa per poi spingersi in Asia e raggiungere l'Oceano Pacifico. La serie meridionale comprende le montagne dell'Africa settentrionale (Rif e Atlante), gli Appennini, le Dinaridi, le Ellenidi, i Monti del Tauro, i Monti Zagros e i Monti dell'Oman. Quella settentrionale comprende la cordigliera Betica, i Pirenei, le Alpi, i Carpazi, i Balcani, i Monti Pontici, la Crimea, il Caucaso e l'Elburz. Simili a due festoni capricciosi, le due catene si allontanano e si avvicinano determinando ampie regioni intermedie come il Mediterraneo occidentale e la Pianura ungherese o avvicinandosi e venendo a contatto come nella regione delle Dolomiti. Oltre che per la loro posizione esse si differenziano anche per essere asimmetriche in direzioni opposte.

Una catena montuosa come le Alpi è formata in gran parte da rocce sedimentarie spiegazzate in gigantesche pieghe, fratturate e spostate. Nell'ammasso di strati che la costituiscono si osservano anche imponenti pacchi rocciosi (« falde di ricoprimento ») trasportati sopra ad altri e che si sono spostati per una lunga distanza rispetto alla loro patria di origine. I geologi, dipanando strato per strato la struttura deformata delle montagne e individuando il senso di rovesciamento delle pieghe che la interessano, sono riusciti a capire la direzione verso cui è avvenuto lo spostamento delle falde di ricoprimento. Nella catena settentrionale le pieghe sono rovesciate verso l'Europa settentrionale; in quella meridionale, verso l'Africa e l'Arabia.

Uno dei dati relativamente sicuri della geologia è che buona parte delle masse rocciose che costituiscono queste due catene si è originariamente formata in un'area oceanica in certe zone dalle dimensioni forse paragonabili a quelle dell'attuale Oceano Atlantico. Questo oceano paleomediterraneo, chiamato Tetide dal geologo austriaco E. Suess (dalla dea greca moglie di Oceano), era milioni di anni fa interposto fra un gruppo di continenti meridionali (Africa-Arabia-India) e un gruppo settentrionale (Eurasia).

Uno dei problemi fondamentali e piú appassionanti nella storia della nostra Terra è racchiuso in questa semplice domanda: per effetto di quali processi dinamici una regione oceanica si trasforma in una imponente catena montuosa come le Alpi o l'Himalaya? A questa domanda non è ancora stata data una risposta del tutto adeguata.

Per cercare di indagare sulla storia tettonica e sedimentaria del Mediterraneo e sulla sua relazione con questo fondamentale problema della origine delle montagne, una speciale nave americana la *Glomar Challenger*, ha operato per due mesi in Mediterraneo dal 13 agosto al 6 ottobre 1970. Questa nave è finora la sola al mondo in grado di trivellare in acque di grande profondità e di prelevare campioni di sedimenti (« carote ») posti diverse centinaia di metri al di sotto del fondo marino. Essa è inoltre provvista di un apparato di posizionamento dinamico che le permette di rimanere sempre nello stesso punto senza bisogno di ancore. I segnali di una emittente sonar, calata sul fondo del mare nei pressi della trivella, vengono ricevuti da quattro idrofoni posti sotto lo scafo e da essi inviati a un calcolatore che controlla i motori della nave; essi rettificano automaticamente ogni spostamento rispetto al foro di perforazione. Si veda in proposito anche l'articolo di M. B. Cita, *Deep Sea Drilling Project*, in « Le Scienze », n. 16, 1969.

La spedizione oceanografica in Mediterraneo rientrava nell'ambito del *Deep Sea Drilling Project* (programma di carotaggio marino a grande profondità). Vi hanno preso parte dieci studiosi di sette paesi (Austria, Francia, Inghilterra, Italia, Romania, Svizzera e USA) invitati espressamente dalla *US National Science Foundation*, proprietaria della nave. Durante i due mesi ininterrotti in mare sono stati perforati 28 pozzi in 15 località (1 in Atlantico, 7 in Mediterraneo occidentale e 7 in Mediterraneo orientale; *si veda l'illustrazione a pag. 28 e 29*) raccogliendo 200 carote per una lunghezza totale di 640 m. La massima penetrazione si è avuta nel mare d'Alboran tra Spagna e Marocco ove lo scalpello della *Glomar Challenger* si è spinto per 867 m al di sotto del fondo del mare, in quel punto profondo 1163 m. La massima profondità complessiva raggiunta è stata di 5121 m nella Fossa ellenica. Qui la sonda ha attraversato 481 m di sedimenti posti sotto una colonna d'acqua spessa 4640 m.

Per la prima volta nella storia dell'uomo gli studiosi hanno potuto avere tra le mani campioni di sedimenti e rocce provenienti da punti cosí profondi del Mediterraneo. Infatti le carote prelevate precedentemente nel Mediterraneo, raccolte sistematicamente dalla nave *Albatross* durante la Spedizione svedese del 1947-48 o da navi americana come la *Vema* o la *Conrad*, erano attorno ai 10 m di lunghezza; la piú lunga non supera i 20 m. Raccogliere campioni di sedimenti cosí profondi è stato come sfogliare pagine completamente sconosciute della storia della crosta terrestre. La roccia piú antica ha un'età di circa 140 milioni di anni.

Il Mediterraneo occupa una depressione lunga circa 4000 km la quale si estende dallo stretto di Gibilterra fino alla costa del Libano. Esso è naturalmente suddiviso in due parti da una barriera arcuata che dalla Tunisia si estende alla Sicilia e all'Italia meridionale. Il Mediterraneo orientale è caratterizzato da un'ampia dorsale sottomarina che si estende dalla Calabria fino a ovest di Cipro per una lunghezza superiore a quella di tutta l'Italia, ossia per circa 1600 km; la sua larghezza varia fra i 50 e i 250 km (*si veda la figura su questa e sulla pagina a fronte*). La cresta della Dorsale mediterranea è a una profondità fra i 2300 e i 3200 m; solo nella piú stretta zona fra Creta e l'Africa essa si innalza fino a una profondità minima di 1300 m. Il fianco settentrionale discende verso la profonda e stretta Fossa ellenica, quello meridionale verso il pavimento abissale del Nilo. Da quest'ultimo la Dorsale si eleva di circa 700 m.

Nella zona a settentrione della Fossa ellenica sono concentrati quasi tutti gli ipocentri dei terremoti del Mediterraneo orientale, la maggior parte dei quali generalmente si colloca in zone poco profonde della crosta terrestre (meno di 180 km). All'interno di questa zona sismicamente attiva si osserva pure un arco di vulcani attivi nelle isole di Milo, Santorino, Nisiro e Coo. Questo allineamento vulcanico è distante circa 200 km dal margine della Fossa ellenica ed è caratteristico per eruttare lave di tipo andesitico. Il bordo meridionale di questo « arco di fuoco » sismicamente e vulcanicamente attivo è inoltre delimitato da una banda caratterizzata da una anomalia gravimetrica negativa. (Una anomalia gravimetrica negativa si ha generalmente in una regione caratterizzata in profondità da una deficienza di massa causata da un forte spessore della crosta continentale di tipo sialico). All'esterno di questo arco, ossia nella sua zona convessa, terremoti e vulcanismo sono pressoché assenti. Fatte le debite proporzioni questa concentrazione di terremoti e vulcani all'interno dell'arco vulcanico egeo ricorda una situazione osservabile nelle regioni alla periferia del Pacifico (per esempio nell'arco giapponese) ove si hanno fosse oceaniche caratterizzate da una anomalia gravimetrica negativa e disposte ad arco.

Un sondaggio effettuato dalla *Glomar Challenger* nella parete interna della Fossa ellenica ha attraversato 400 m circa di sedimenti quaternari e successivamente calcari e dolomie neritici (depositi cioè in acque basse) del Cretaceo inferiore (con un'età di circa 100 milioni di anni). Al di sotto dei calcari, la sonda ha ritrovato ancora terreni piú recenti costituiti da fanghi pelagici a stratificazione orizzontale del Pliocene medio (circa 3-4 milioni di anni). Altri sondaggi effettuati attraverso la Fossa ellenica a una profondità del fondo fino a oltre 4600 m hanno permesso di ricostruire l'andamento della stratificazione delle varie unità sedimentarie e di mettere in evidenza una disposizione inclinata degli strati verso il fianco settentrionale della fossa e la loro brusca troncatura contro di esso.

In un sondaggio piú meridionale effettuato sopra la Dorsale mediterranea, con sorpresa, si è carotato, al di sotto di un sottile manto di sedimentazione pelagica molto recente, una successione quaternaria data da argille e arenarie torbiditiche di composizione simile a una successione carotata nel pavimento abissale del Nilo. In entrambi i casi il materiale detritico proviene dal deserto arabico e deve essere stato trasportato in mare dal Nilo. Le sabbie infatti contengono un gran numero di granuli di quarzo caratteristicamente di tipo desertico, ossia ben arrotondati, di forma sferica e con superficie smerigliata per effetto dei continui urti ricevuti durante il trasporto eolico terrestre.

Questo ritrovamento sembra significare che la Dorsale mediterranea, in un ancora recente passato geologico, doveva far parte del pavimento abissale sottomarino del Nilo. Successivamente movimenti compressivi di deformazione crostale devono aver elevato i depositi del pavimento abissale di qualche centinaio di metri sopra la base della attuale piana sottomarina del Nilo formando cosí la catena montuosa sottomarina (*si veda l'illustrazione a pag. 33*). In generale l'insieme dei carotaggi della *Glomar Challenger* e i precedenti dati, ricavati dalla campagna geofisica di preparazione della spedizione, indicano un movimento di compressione fra Africa ed Europa nel Mediterraneo orientale. In questa regione di compressione il fondo del Mediterraneo sembra sprofondare al di sotto del Mare Egeo in corrispondenza dell'« arco di fuoco » cretese. È stato calcolato da X. Le Pichon che per effetto di questo sprofondamento il bacino si restringe ogni anno di 2,6 cm. Se il processo continuerà con le stesse modalità e la distruzione del fondo per inabissamento al di sotto dell'arco seguiterà con la stessa velocità, tra 10-20 milioni di anni la regione occupata dall'attuale Mediterraneo orientale sarà occupata da una catena montuosa formatasi per la inevitabile

Panorama del Mediterraneo preparato con i dati degli studi batimetrici condotti da B.C. Heezen, N. Tharp e W.B.F. Ryan.

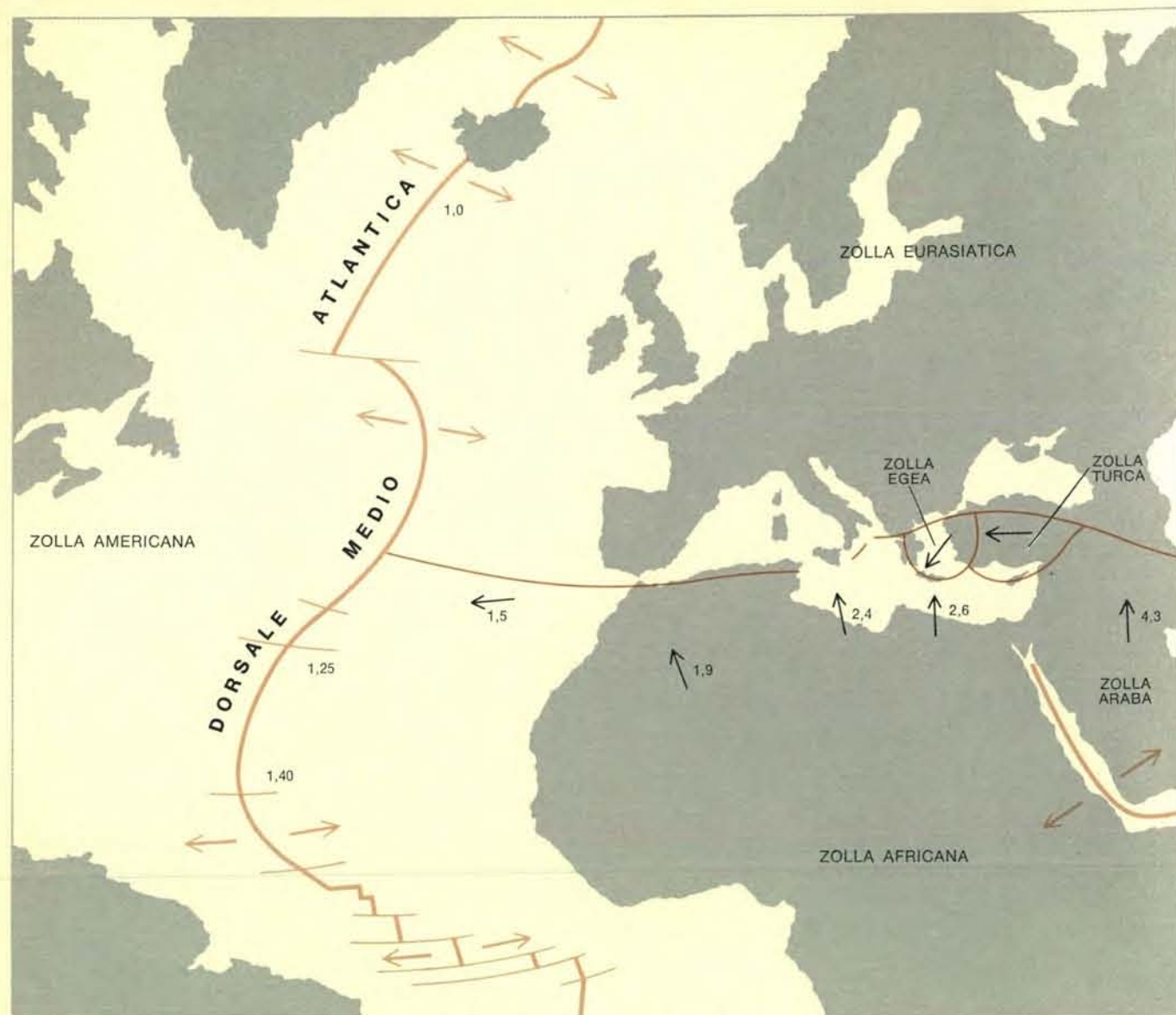
Nell'immagine sono indicati i pozzi perforati in Mediterraneo durante la crociera 13 del Deep Sea Drilling Project durata dall'agosto all'ottobre 1970. Per la prima volta nella storia dell'uomo sono stati campionati strati sedimentari profondi nel Mediterraneo. La sonda della *Glomar Challenger* ha attraversato circa 5000 metri di sedimenti campionandone 640 metri.

collisione di Libia ed Egitto contro Grecia e Turchia.

Si intravede cosí una prima risposta al problema dell'origine delle montagne, della loro formazione e sollevamento. La loro origine embrionale deve essere fatta risalire alla fase terminale della vita di un oceano quando esso si chiude per effetto dello sprofondamento e scorrimento di una zolla litosferica al di sotto di un'altra. Quando la massa continentale, portata passivamente sul dorso della zolla che sottoscorre, arriverà nella regione di discesa e sprofondamento (o « zona di subduzione ») essa si scontrerà con la opposta massa continentale determinando la formazione di una catena montuosa. Questa ipotesi si basa sulla teoria della tettonica a zolle che non è da confondere con la teoria della deriva dei continenti del meteorologo berlinese A. Wegener. Mentre nell'ipotesi wegeneriana i blocchi continentali si muovono, scorrendo come bastimenti rigidi, sopra un fondo oceanico viscoso, nella tettonica a zolle si muovono sia i fondi oceanici sia i continenti sotto forma di giganteschi segmenti o zolle della litosfera. La tettonica a zolle non implica la deriva dei continenti ma è compatibile con essa. I continenti sono trasportati come passeggeri passivi sopra zolle rigide che si muovono scivolando sull'astenosfera, come iceberg galleggianti. La litosfera è attualmente suddivisa in una mezza dozzina di grandi zolle principali, oltre a parecchie altre zolle minori. Le sei zolle principali (Eurasia, Africa, India, Pacifico, Antartico e Americhe) sono cosí grandi che ciascuna di esse, salvo la zolla pacifica, porta uno o due continenti passivi e molta parte del fondo oceanico. Il movimento orizzontale relativo fra le zolle litosferiche determina i terremoti in quanto esse in un certo senso si spingono l'un l'altra. La causa dello spostamento delle zolle è fatta risalire da F. A. Vening Meinesz, da W.M. Elsasser e altri studiosi a movimenti convettivi limitati a un sottile strato della Terra compreso fra una profondità dell'ordine dei 100 km e una dell'ordine dei 400 km. La circolazione convettiva sarebbe causata da differenze di densità dei materiali createsi per differenze di temperatura legate alla distribuzione degli elementi radioattivi (torio, uranio ecc.) nell'interno di questo strato.

Un'altra indicazione di una compressione tettonica è stata ricavata dall'esame delle carote sottomarine raccolte nell'unico pozzo perforato in Atlantico a occidente del Portogallo. La situazione fa pensare a un sollevamento e scorrimento di un pacco di strati verso sud. Alla base della successione sovrascorsa è stata rinvenuta una roccia eruttiva gabbroide con età di circa 135-140 milioni di anni, molto simile alle ofioliti alpine e appenniniche e corrispondente al *layer 3* della crosta oceanica.

Di grande interesse è il fatto che l'intera successione stratigrafica attraversata dalla perforazione sia del tutto simile a un'altra coeva carotata dalla *Glomar Challenger* sull'altra sponda dell'Atlantico, al largo di Washington. Le due serie stratigrafiche sono attualmente separate da ben 6000 km di distanza! Ciò rappresenta una chiara conferma della espansione simmetrica dell'Oceano Atlantico a partire dalla Dorsale medio-oceanica con una velocità media di circa 1,5 cm all'anno da ciascun lato della dorsale (*si veda l'illustrazione a pag. 30*). La natura dei materiali trovati suggerisce inoltre che l'Atlantico già 135-140 milioni di anni fa era un oceano profondo; il che si accorda con il fatto che, come è noto, l'inizio dell'apertura dell'Atlantico centrale viene fatta risalire a circa 180 milioni di anni fa. L'ubicazione della località perforata a occidente del Portogallo sembra indicare che la Penisola iberica si sia mossa assieme all'Africa durante le prime fasi dell'apertura dell'Oceano Atlantico.

I dati ricavati durante la Crociera mediterranea della *Glomar Challenger* fanno sí che si incominci a capire l'evoluzione della regione mediterranea e le ragioni della disposizione a festoni della doppia serie di catene di

La litosfera è attualmente suddivisa da fratture in gigantesche zolle rigide. Due di queste principali zolle, Eurasia e Africa, si allontanano entrambe dalla Dorsale medio-atlantica e si muovono all'incirca verso oriente. Poiché avanzano con direzioni e velocità leggermente differenti il risultato è una convergenza che dura da circa 10 milioni di anni. Pertanto gli attuali movimenti fra Africa e Eurasia sono movimenti di compressione quasi pura dell'ordine dei 2 cm all'anno. Le frecce nere indicano le direzioni di movimento della zolla litosferica africana (e di due piú piccole zolle intermedie) rispetto alla zolla eurasiatica. Gli approssimativi limiti tra le zolle e i valori della compressione sono stati determinati principalmente da X. Le Pichon e D. McKenzie. In colore le dorsali in espansione; i valori per l'Atlantico sono ricavati dal JOIDES e da Ninkovich e Hays.

cui si è parlato all'inizio di questo articolo. La storia tettonica di queste catene è strettamente legata ai movimenti relativi delle due grandi zolle litosferiche dell'Africa e dell'Europa. Esse, pur allontanandosi continuamente dalle Americhe e spostandosi verso est, si sono mosse durante gli ultimi 180 milioni di anni con direzione e velocità differenti. Attualmente, per effetto di leggere differenze di direzione e di velocità, fra le due zolle si ha una leggera convergenza che sta determinando il movimento di compressione quasi pura che provoca il restringimento del Mediterraneo orientale. La tendenza dell'Africa in tempi passati a muoversi piú velocemente dell'Europa verso oriente avrebbe prodotto secondo S. W. Carey la torsione necessaria a produrre la disposizione ad « S » delle catene mediterranee e a facilitare la rotazione in senso antiorario della Corsica e della Sardegna, che prima dell'Oligocene, dovevano essere attaccate alla costa francese e spagnola.

Altri importanti ritrovamenti della spedizione sono stati fatti nel Bacino balearico e nel Bacino tirrenico. Già da tempo le prospezioni geofisiche, effettuate specialmente dagli oceanografi francesi, avevano messo in evidenza la presenza di curiose strutture a cupola in sedimenti coperti dagli spessi depositi del pavimento abissale del Bacino balearico e del Mar Ligure. Queste colline abissali al di sotto del fondo marino sono state interpretate rispettivamente come vulcani sepolti, masse argillose, anticlinali e diapiri salini. I carotaggi effettuati hanno permesso di accertare definitivamente che si tratta di depositi evaporitici e che la loro età corrisponde al Miocene superiore (circa 5,5-6,5 milioni di anni). Questa determinazione cronologica pone fine a una lunga controversia dovuta al fatto che alcuni studiosi ritenevano questi depositi di età triassica (180-225 milioni di anni) anziché miocenica.

Si tratta di precipitati salini (evaporiti) che si sono depositati per intensa evaporazione dell'acqua marina. Le condizioni necessarie per la loro deposizione sono: un clima secco e arido (o semi-arido); un bacino di deposizione chiuso e separato dall'oceano in modo che l'acqua salata possa concentrarsi; un continuo o intermittente apporto di acqua marina da evaporare nel bacino; un bacino che lasci spazio alla continua deposizione delle evaporiti. L'idea dominante tra gli specialisti è che le successioni evaporitiche si siano deposte in una serie di lagune soprasalate del tipo dell'attuale Golfo di Kara Bogaz, una depressione poco profonda in saltuaria comunicazione con il Mar Caspio. Le lagune sarebbero state separate dal mare aperto per la presenza di una barriera e in esse la profondità dell'acqua non avrebbe superato i pochi metri. Malgrado ciò i depositi salini fossili hanno talora spessori che superano anche i 1000 metri; per spiegare tale fenomeno, la maggior parte dei geologi pensa a un continuo sprofondamento (subsidenza) del fondo della laguna. In tal modo la deposizione delle evaporiti sarebbe avvenuta in condizioni di acque molto basse malgrado il successivo sprofondare del fondo del bacino. Questi depositi evaporitici contengono talora sali commercialmente molto importanti quali il salgemma e i sali potassici.

I carotaggi della *Glomar Challenger* nel Bacino balearico hanno rinvenuto solfati di calcio sotto forma di gessi e anidriti (e persino salgemma puro a poco piú di 3 km di profondità) sepolti sotto poco piú di 300 m di sedimenti del pavimento abissale (*si veda la figura a pag. 26 in basso a sinistra*). La sottile intercalazione di sedimenti marini normali nel salgemma ha permesso di datare l'epoca di precipitazione delle evaporiti (Miocene superiore). I profili geofisici effettuati prima della crociera scientifica hanno mostrato che lo spessore di questo orizzonte evaporitico varia da una media di 300-500 m a un massimo di 1000 m notato a NE delle Baleari. I depositi gessosi selenitici, le anidridi laminate o nodulari e il salgemma con lamine anidritiche hanno le stesse caratteristiche litologiche dei depositi del Miocene superiore osservati con gli stessi caratteri d'insieme in molte località perimediterranee (Spagna, Algeria, Tunisia, Sicilia e molte località della penisola italiana). Tali depositi visibili attualmente su terra sono denominati « formazione gessoso-solfifera ». Nella Sicilia centrale questi giacimenti sono attualmente sfruttati per estrarne salgemma e sali potassici. Ciò che piú colpisce però è che essi si trovano ora fino a ben 800 m sopra l'odierno livello del mare.

Ci si trova quindi di fronte a movimenti crostali verticali di ampiezza paragonabile a quelli che hanno innalzato il Cervino. Se infatti le evaporiti si sono deposte in lagune continentali bisogna immaginare che a partire da circa 6 milioni di anni fa l'area mediterranea sia stata sottoposta a giganteschi movimenti verticali. Lo sprofondamento delle evaporiti del Bacino balearico e tirrenico deve essere stato repentino perché i depositi salini sono bruscamente sormontati da sedimenti di mare aperto e di una certa profondità.

Per spiegare questi fatti alcuni geologi francesi hanno riproposto l'ipotesi della « flessura continentale » sviluppata decenni fa da J. Bourcart e O. Jessen. In corrispondenza all'incirca della regione limite tra terra e mare, che funziona da fulcro, i continenti subirebbero un movimento a bilancia con sprofondamento delle parti sommerse e simultaneo sollevamento delle zone continentali. Durante gli ultimi 5-6 milioni di anni un movimento catastrofico a flessura avrebbe causato l'affossamento dei depositi salini al margine dei continenti e il loro seppellimento al di sotto dei sedimenti della piana abissale. Contemporaneamente dal lato continentale le evaporiti si sarebbero sollevate fino alle quote odierne.

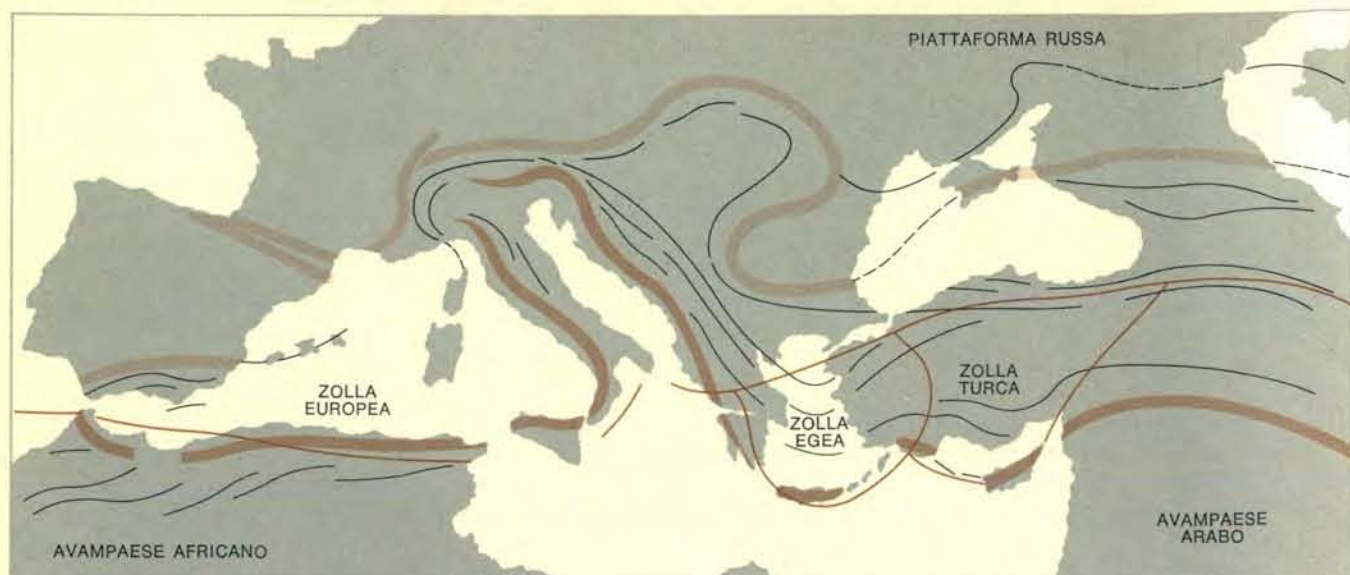
D'altra parte una analisi critica dell'ambiente di deposizione delle evaporiti del Miocene superiore rinvenute su terra porta a dubitare che l'intero spessore dei depositi si sia deposto in ambiente lagunare. Un esempio attuale di deposizione evaporitica profonda è visibile nel Mar Rosso. Entro la sua zona centrale, sul fondo di un piccolo bacino profondo ben 2000 m e ubicato tra Sudan e Arabia Saudita a ovest de La Mecca, sono stati carotati sedimenti con intercalati sottili straterelli di anidrite massiccia. È pur vero che le condizioni ambientali sono eccezionali in quanto al fondo del bacino si hanno acque molto calde (fino a 56 °C) e provviste di una salinità 7 volte maggiore di quella normale che, come è noto è di circa 35 parti su mille. Datazioni assolute hanno mostrato che l'attività che ha prodotto le acque bollenti e soprasalate al fondo è incominciata circa 10 000 anni fa e continua anche oggi. Le carote del Mar Rosso hanno fornito la prova diretta che la precipitazione chimica delle evaporiti può realmente avvenire a grande profondità (a 2000 m). Esse mettono in dubbio l'equazione corrente:

evaporiti = depositi di acque basse

e propongono la nuova possibilità della origine profonda dei depositi salini. Un'origine marina profonda anziché lagunare, spiegherebbe in maniera piú soddisfacente la continua presenza alla base della « formazione gessoso-solfifera » di depositi indicativi di acque stagnanti al fondo (depositi detti euxinici). Si tratta di marne bituminose e marne fogliettate denominate « tripoli » osservate per esempio in Sicilia e in quasi tutta la Penisola. Spiegherebbe meglio anche la presenza sotto ai gessi di depositi a solfuri e soprattutto i giacimenti di zolfo. Questi sedimenti euxinici contengono solo resti fossilizzati di organismi nectonici e planctonici che vivevano nelle acque superficiali, mentre sono scarse le tracce di organismi bentonici, se si escludono rare minuscole ostriche viventi su fondi profondi. Tra gli organismi delle faune superficiali sono stati rinvenuti abbondanti resti di Pesci (fossilizzati anche nello zolfo nativo), microfossili silicei (Diatomee in grande quantità e Radiolari) e microfossili calcarei (Foraminiferi pelagici). I sedimenti tripolacei, ricchi di resti organici, di solfuri e con idrocarburi gassosi e bituminosi, indicano ristagno delle acque al fondo del bacino per effetto di una circolazione ristretta e conseguente mancanza di ossigeno. In queste condizioni i resti organici depositati dalle acque superficiali non venendo distrutti per ossidazione si accumulano sul fondo dando luogo a depositi bituminosi. Da queste melme fetide sul fondo avvelenato si doveva sviluppare idrogeno solforato che, reagendo con gli ioni presenti nelle acque sovrastanti, dava origine a solfuri.

D'altra parte nei depositi gessosi della parte sommitale della « formazione gessoso-solfifera » in Sicilia e altrove vi sono indicazioni sedimentologiche e faunistiche di una deposizione in acque molto basse. Osservazioni preliminari sulle evaporiti siciliane, integrate con quelle sulle evaporiti baleariche e tirreniche, porterebbero a supporre una iniziale deposizione (o rideposizione) in acque profonde seguita da una deposizione finale in acque molto basse.

Ci si trova quindi di fronte a un nuovo grosso problema: è possibile che un mare inizialmente profondo, diciamo fino a 1000 m (spessore massimo della serie evaporitica), e largo come tutto il Mediterraneo occidentale si prosciughi completamente? Per evaporazione dell'acqua di mare si può avere il completo riempimento di un bacino con depositi evaporitici con conseguente trasformazione di un mare profondo diverse centinaia di metri in una zona continentale con lagune e laghi salmastri?

Teoricamente è possibile immaginare un modello, di iniziale deposizione profonda e successivo completo prosciugamento, come quello recentemen-

I due principali sistemi montuosi della regione mediterranea sono essenzialmente il risultato dell'interazione delle due grandi zolle africana ed eurasiatica durante il tempo geologico. Essi sono pertanto in relazione con la formazione e successivo allargamento dell'Oceano Atlantico. Le due catene, indicate dalle due bande di colore piú tenue e piú intenso, probabilmente si formarono per chiusura dell'originaria regione oceanica intermedia come risultato della compressione fra Africa ed Europa. La linea continua in colore indica i limiti attuali delle zolle rigide (limiti corrispondenti alle fasce ad alta sismicità).

te proposto dal geologo americano R. F. Schmalz. All'inizio, nel bacino a circolazione ristretta e con condizioni climatiche favorevoli, l'evaporazione delle acque marine in superficie determina una sempre maggiore salinità delle acque. Essendo piú concentrate e pertanto piú dense, esse scendono in profondità, portando con sé l'ossigeno, e si insediano sul fondo spostando le normali acque marine meno dense. Per effetto di questo processo le acque del fondo diventano cosí dense e concentrate da non essere piú rimpiazzate da quelle superficiali. Come risultato non vi è piú circolazione e trasporto di ossigeno dalla superficie: si ha cosí un fondo quieto con ristagno delle acque prive di ossigeno. Sul fondo si accumulano i resti degli organismi che vivevano nelle zone superficiali e che morivano in gran numero quando la salsedine in superficie diventava eccessiva per la loro tolleranza. In sostanza questa fase euxinica si raggiunge per intrappolamento di acque soprasalate e ad alta densità per effetto di una soglia o barriera fisica che limita le comunicazioni con l'oceano aperto (nel nostro caso specifico l'Oceano Atlantico) a uno scambio soltanto superficiale (entrata di acque a salinità normale e uscita di acque piú salate).

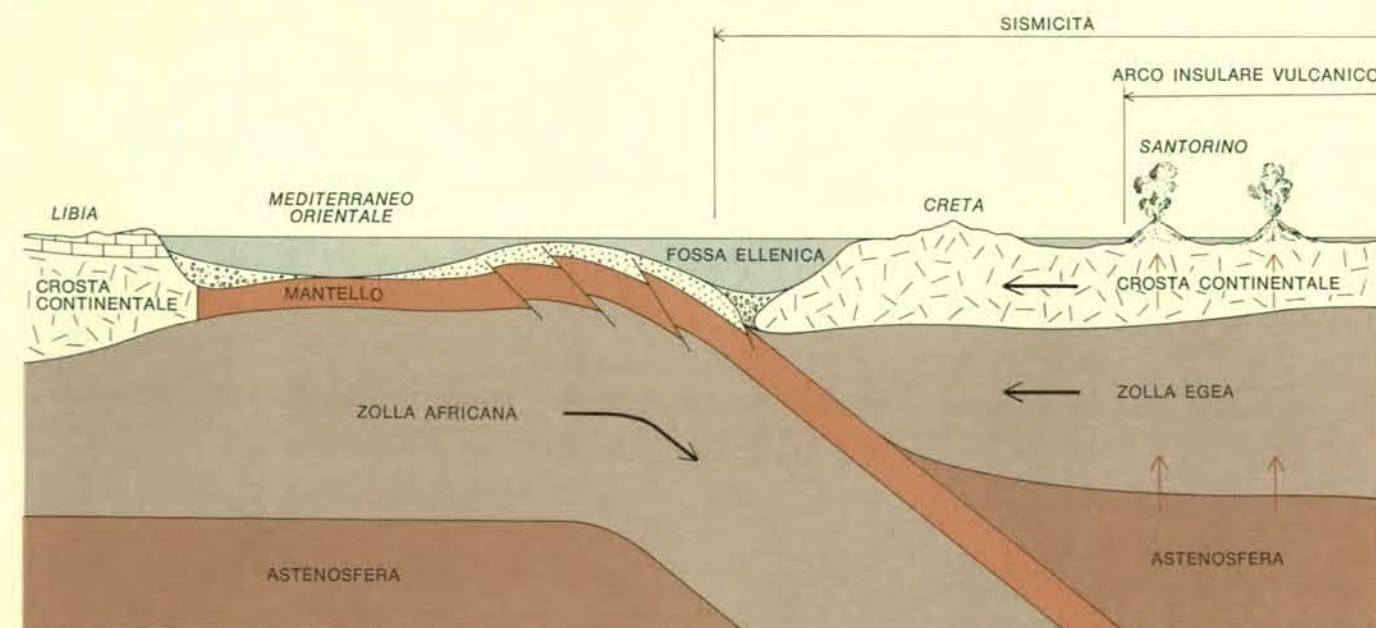
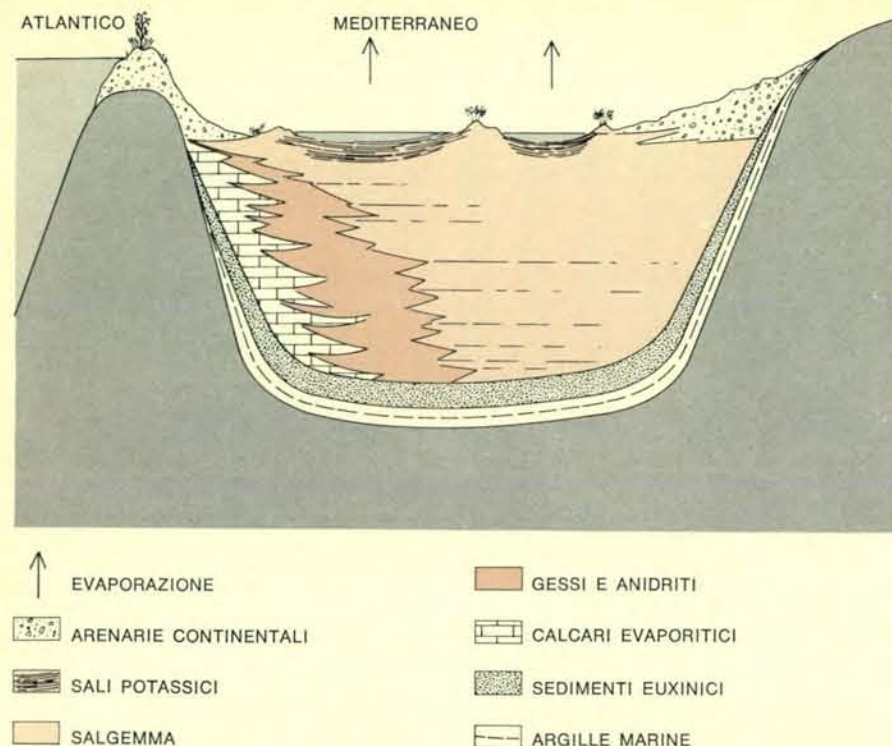
Se il processo di evaporazione continua le acque di superficie possono diventare cosí concentrate che quando il valore della salinità diviene 5 volte quella normale si ha la precipitazione in superficie del solfato di calcio sotto forma di gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). I cristalli di gesso formatisi in superficie scendono verso il fondo del bacino attraversando acque non ancora sature di solfato di calcio. Per questo fatto si dissolvono durante la discesa e non si depositano sul fondo che continua a essere stagnante e avvelenato. Questo processo continuamente ripetuto porta al riempimento del bacino con acque salate sature di solfato di calcio. A cominciare da quel momento si ha una fase di permanente deposizione evaporitica: il solfato di calcio precipitato in superficie continua ad accumularsi sul fondo sotto forma di cristalli di gesso senza essere piú disciolto durante la discesa. Quando in superficie la concentrazione è circa pari a un decimo dell'originale volume e la salinità di circa 300 parti per mille precipita il salgemma (NaCl) che, per effetto della non saturazione delle acque, si scioglie prima di arrivare al fondo. La continua produzione di salgemma per evaporazione delle acque superficiali determina il riempimento del bacino con acque sature di NaCl e pertanto la sua successiva preservazione al fondo. Cosí si ha una permanente deposizione di sali sempre piú solubili (sali potassici) e commercialmente pregiati.

Questa fase di permanente evaporazione con deposizione di evaporiti sembra simile a quella attualmente osservata nel Mar Rosso che ha portato alla precipitazione del solfato di calcio anidro (anidrite) e alla sua deposizione a una profondità di 2000 m. Naturalmente durante questo periodo evaporitico le acque di superficie sono troppo salate per permettere la vita degli organismi; le evaporiti accumulate sul fondo sono pertanto prive di resti organici. Se per una qualsiasi ragione vi è un cambiamento nelle condizioni superficiali e si ha una diluizione delle acque, allora si può osservare di nuovo la deposizione al di sopra dei depositi di salgemma di sali meno solubili come il solfato di calcio. In definitiva il tipo di evaporiti deposto e la loro distribuzione nello spazio è in stretta connessione con le acque di superficie e con l'eventuale presenza di correnti marine. Durante una fase terminale, se a causa della barriera viene a cessare il continuo afflusso di acqua oceanica nel bacino evaporitico, si può avere la totale evaporazione dell'acqua marina. In tal caso si ha la precipitazione, in depressioni topografiche coperte da acque basse, dei sali piú solubili ricchi in potassio (*si veda l'illustrazione a pag. 34*). Un attuale esempio di evaporazione fino al prosciugamento con precipitazione di abbondanti e spessi depositi salini in superficie è visibile in Etiopia in una regione depressa, denominata Piano del Sale. Si tratta di una depressione che si trova al di sotto del livello del mare e che è stata isolata dal Mar Rosso da un accumulo di lave eruttate da vulcani ancora attivi. Verso la parte centrale della depressione, a circa 130 m sotto il livello del mare, si sono deposti sali potassici legati all'evaporazione di masse d'acqua marina che ha saltuariamente sommerso la depressione; anche oggi si osservano occasionali inondazioni marine.

Se gli studi in atto da parte dei 10 partecipanti alla spedizione mediterranea proveranno l'origine profonda della successione inferiore delle evaporiti presenti nel Bacino balearico e in quello tirrenico, allora se ne potrà dedurre che il Mediterraneo occidentale circa 6 milioni di anni fa (durante la fase evaporitica terminale) doveva costituire una regione completamente o quasi prosciugata (*si veda l'illustrazione a pag. 34*). Essa doveva essere depressa di qualche centinaio di metri sotto il livello dell'Oceano Atlantico da cui era separata da una barriera che impediva l'entrata delle acque atlantiche. In questa regione all'asciutto vi erano alcune zone occupate da laghi salmastri dove si depositavano i cosiddetti strati a Congerie caratterizzati da faune ipohaline che si ritrovano in Romagna, nelle Marche e in Sicilia nella parte sommitale della « formazione gessoso-solfifera ».

Alla fine del Miocene, per rimozione della barriera e ripristino delle comunicazioni con l'Oceano Atlantico, una repentina inondazione marina deve avere simultaneamente ricoperto tutta la regione mediterranea depressa, simile al diluvio biblico di cui parla la Genesi « che coprí di 7 cubiti i monti piú alti ». Sia nelle carote sottomarine profonde raccolte dalla *Glomar Challenger* nel Mediterraneo occidentale che negli affioramenti terrestri, la serie evaporitica è bruscamente ricoperta da sedimenti pelagici marini (marne a Coccoliti e Globigerine) contenenti microfossili bentonici indicativi di una profondità abbastanza elevata del bacino marino. Negli affioramenti siciliani, le faune indicano in media una profondità del mare compresa fra un minimo di 150 m e un massimo di 600 m circa. L'estensione del mare pliocenico sembra essere stata maggiore di quella del mare del Miocene superiore (successivamente prosciugato) perché i sedimenti dell'inondazione ricoprono in «trasgressione» anche terreni piú antichi che all'inizio del Miocene superiore dovevano essere emersi. Questa interpretazione di una rapida sommersione della regione mediterranea, rimasta all'asciutto al termine della fase evaporitica con aree occupate da laghi salmastri, è in armonia con i dati geologici e paleontologici ricavati dallo studio delle successioni terrestri in diverse regioni italiane.

I numerosi strati sedimentari che si accumulano sul fondo del mare sono come le pagine di un libro della storia della Terra. In esse sono scritte le numerose vicende riguardanti la passata disposizione geografica delle terre e dei mari, il clima e la circolazione marina del passato. I campioni di sedimenti estratti dal fondo del Mediterraneo hanno permesso di dare un'occhiata a capitoli prima sconosciuti. Le pagine piú recenti del libro del Mediterraneo indicano che, dopo la repentina invasione delle acque atlantiche avvenuta all'inizio del Pliocene, le normali condizioni marine perdurarono fino ai giorni nostri. Solo durante il Quaternario recente vi furono brevi periodi di ristagno o semi-ristagno delle acque di fondo del Mediterraneo orientale.

I fanghi sapropelitici, cioè ricchi di sostanze organiche depostesi in condizioni riducenti, carotati in piú località del Mediterraneo orientale, sono indicativi appunto di un ambiente euxinico al fondo (*si veda la figura a pag. 26 in basso a destra*). Tali depositi sapropelitici di colore scuro sono in relazione con fluttuazioni climatiche indicate dai Foraminiferi pelagici, alcuni dei quali sono sensibili alla temperatura delle acque superficiali in cui vivono. Il geofisico americano W. B. F. Ryan, uno dei due capi della spedizione mediterranea della *Glomar Challenger*, ha messo in evidenza che gli strati sapropelitici si trovano sempre in corrispondenza di picchi di maggior temperatura delle acque superficiali del bacino e molto vicino ai periodi in cui massima era l'altezza del livello del mare (periodi di ritiro dei ghiacciai). Infatti durante l'ultimo milione di anni vaste regioni dell'Europa settentrionale erano ricoperte dalla calotta glaciale scandinava, simile all'attuale calotta della Groenlandia. Un'altra indipendente massa ghiacciata copriva la regione alpina. Il Quaternario « glaciale » della regione alpina è caratterizzato da un'alternanza di 5 periodi freddi di avanzata dei ghiacciai separati da 4 periodi caldi interglaciali di ri-

Schema in cui è ipotizzato un possibile meccanismo per spiegare i sedimenti deformati della dorsale del Mediterraneo orientale, la sismicità e il vulcanismo del Mar Egeo. Se il processo di avvicinamento dell'Africa all'Europa (*frecce in nero*) continuerà con il ritmo attuale, fra una decina di milioni di anni dal Mediterraneo orientale sempre piú ristretto sorgerà una catena montuosa. Durante la spedizione 3 pozzi sono stati carotati nella Fossa Ellenica (127, 128 e 129) e 3 sulla dorsale mediterranea (125, 126 e 130). Le frecce in colore indicano la possibile alimentazione del vulcanismo dell'arco insulare.

Probabile situazione del Mediterraneo occidentale alla fine del Miocene superiore (circa 5-6 milioni di anni fa). Esso costituiva una regione depressa, qualche centinaia di metri al di sotto del livello dell'Oceano Atlantico, da cui era separata da una barriera. Parte della regione doveva essere all'asciutto, parte occupata da laghi salmastri o da bacini in cui si depositavano sali molto solubili (per esempio, i sali potassici della Sicilia centrale). La successiva rottura della soglia determinò la catastrofica inondazione della regione mediterranea e quindi il ritorno alle condizioni di mare aperto.

tiro e di fusione dei ghiacciai. I livelli euxinici sono essenzialmente concentrati in corrispondenza dei periodi interglaciali. Per spiegare questa correlazione l'oceanografo svedese E. Olausson ha formulato l'ipotesi che segue.

Durante i periodi glaciali si ha un abbassamento del livello del Mediterraneo orientale. In conseguenza di questo abbassamento emergono soglie poco profonde, come quella del Bosforo (profonda 40 m) che lo separa dal Mar Nero, e il bacino del Mediterraneo diviene pressoché isolato. Aumentano così la salinità e di conseguenza la densità delle acque superficiali che, essendo piú pesanti, scendono al fondo portando seco l'ossigeno. All'inizio del successivo periodo interglaciale il livello del mare riprende a salire per effetto dell'apporto delle acque di fusione dei ghiacciai. Dato che queste ultime sono meno salate di quelle presenti in precedenza si ha una riduzione della densità delle acque superficiali. Continuando l'afflusso delle acque di fusione, quando il livello del mare raggiunge un'altezza superiore a quella della soglia del Bosforo e cioè supera i -40 metri si ha uno scambio di acque tra i due bacini; le acque dense dell'Egeo entrano nel Mar Nero spostando grandi volumi di acque piú leggere. Come risultato un nuovo grande afflusso di acque di fusione (a bassa densità) si riversa per trabocco dal Mar Nero entro l'Egeo e successivamente entro il Mediterraneo orientale, restando per alcune migliaia di anni come una sottile pellicola superficiale. L'abbassamento di densità delle acque superficiali di quest'ultimo bacino è tale da precludere ogni loro discesa verso il fondo. Dopo circa 1000 anni di assenza di circolazione l'ossigeno ancora presente sul fondo si esaurisce. In questo ambiente privo di ossigeno e stagnante si accumulano i fanghi sapropelitici scuri. Questa fase dura fino al ripristino della circolazione che avviene nel successivo periodo glaciale.

Altre interessanti scoperte deriveranno dallo studio dei diversi componenti litologici e faunistici delle 200 carote raccolte. Sedimenti particolarmente adatti alle indagini scientifiche (biostratigrafiche, paleoclimatologiche, geochimiche ecc.) sono quelli raccolti nel Mar Tirreno (località 132). Qui si dispone di una successione pelagica continua spessa 188 m e rappresentativa di tutto il Pliocene e il Quaternario. In questi strati sono ben rappresentati microfossili pelagici costituiti sia da Foraminiferi planctonici (Protozoi provvisti di conchiglia di diametro sovente inferiore a 1 mm) sia da elementi di alghe coccolitoforidi (Discoasteridi e Coccoliti). Dal loro studio lungo la successione verticale si potranno ricostruire i cambiamenti morfologici avvenuti durante gli ultimi 5,5 milioni di anni. Il progressivo cambiamento col tempo dei caratteri del guscio dei Foraminiferi (per esempio, sviluppo di una catena periferica, variazione nella direzione d'avvolgimento ecc.) è considerato in gran parte frutto di una evoluzione organica. Le tappe evolutive sono di grande importanza in geologia perché permettono di stabilire una scala cronologica relativa e quindi di fissare in relazione a essa la posizione degli strati che contengono i fossili. Gli organismi planctonici, animali o piante, data la loro abbondanza e rapida diffusione entro tutti i mari, costituiscono il miglior mezzo di datazione e correlazione a lunga distanza degli strati. Finora le ricerche su terra non avevano permesso lo studio di dettaglio della completa evoluzione faunistica dei Foraminiferi del Pliocene e del Quaternario per mancanza di una successione completa costituita da sedimenti di mare aperto. Le carote raccolte nel Tirreno contengono numerosi livelli quaternari di ceneri vulcaniche ai quali sembrano applicabili i metodi di datazione assoluta; conoscendo l'età assoluta di tali livelli si potrà anche determinare quella delle principali vicende faunistiche evolutive che hanno lasciato tracce negli strati sopra o sotto di essi. Lo studio della composizione petrografica dei livelli di ceneri potrà inoltre permettere di ricavare informazioni sulla storia dei vulcani esplosivi della Penisola (per esempio il Vesuvio e i Campi Flegrei) durante gli ultimi 2 milioni di anni.

In sostanza il fondo del Mediterraneo è stato continuamente influenzato dalla deriva continentale relativa dell'Europa e dell'Africa in allontanamento dall'America da circa 180 milioni di anni. Nelle carote raccolte sono stati documentati diversi esempi della interazione fra Africa ed Europa. Negli strati sedimentari preservati nelle carote vi sono testimonianze di una complessa storia sedimentaria e tettonica del Mediterraneo. In tempi piú antichi di circa 14 milioni di anni fa vigorose correnti marine profonde provenienti dall'Atlantico dovevano scorrere alla base della scarpata continentale dell'Africa settentrionale modellando un grande prisma sedimentario sottomarino, costituito da argille e letti di arenarie fini. Il successivo restringimento della regione mediterranea, causato dalla compressione fra Africa ed Europa, ha determinato l'isolamento e il prosciugamento per evaporazione del bacino nel Miocene superiore. Come si è visto, circa 5 milioni di anni fa i bacini prosciugati furono « annegati » per riapertura delle connessioni con l'Oceano Atlantico. Da allora la vita marina microscopica ha prosperato nelle acque mediterranee con alta produttività organica. Solo nelle parti profonde del Mediterraneo orientale si ebbero occasionali ristagni delle acque di fondo (della durata di qualche migliaia di anni) al tempo delle fasi di ritiro delle grandi calotte glaciali quaternarie.

La storia schematicamente delineata in questo articolo ha carattere provvisorio. Informazioni piú complete con la descrizione delle carote, i differenti dati specializzati (come analisi mineralogiche, granulometrie, informazioni biostratigrafiche ecc.), le interpretazioni sugli aspetti regionali della sedimentologia e paleontologia, saranno contenute nel volume della spedizione che sarà probabilmente in commercio tra non molto tempo. I risultati esposti in questo libro forniranno informazioni iniziali circa la natura e la dinamica dei processi geologici che hanno interessato la regione mediterranea, ma soprattutto porteranno a un generale ripensamento dei nostri precedenti concetti geologici su scala globale. Essi serviranno a creare un collegamento tra vari settori artificiosamente separati delle scienze della Terra.

Da un punto filosofico queste ricerche rientrano nel quadro della radicale rivoluzione scientifica in atto nello studio della Terra che sta portando a un cambiamento di prospettiva con la sostituzione dei classici concetti della geologia convenzionale con quelli moderni basati sullo studio degli oceani. Per un secolo e piú i bacini oceanici sono stati considerati permanenti e i continenti sono stati ritenuti approssimativamente fissi nella posizione in cui oggi si osservano fin dal tempo della loro creazione. Oggi le moderne scoperte oceanografiche (specialmente geofisiche) e i carotaggi profondi effettuati dalla *Glomar Challenger* hanno dimostrato la grande mobilità sia dei continenti sia dei bacini oceanici. La crociera in Mediterraneo rappresenta infatti la tredicesima della serie (Leg 13). Le precedenti crociere oceanografiche (sempre della durata di 2 mesi) effettuate nell'Oceano Atlantico e nell'Oceano Pacifico hanno già fornito dati scientifici la cui importanza è stata paragonata alle nuove informazioni fornite dalla esplorazione della Luna.

Le maree e il sistema Terra-Luna

L'attrito delle maree nelle acque poco profonde ha regolato da sempre l'evoluzione del sistema Terra-Luna. A esso è dovuto l'allungamento del giorno e l'allontanamento sempre maggiore della Luna dalla Terra

di Peter Goldreich

Chiunque abbia passato un po' di tempo su una spiaggia conosce le maree: il periodico avanzare e retrocedere del mare. È ben noto che le maree sono dovute all'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole sulla Terra. Non altrettanto bene si conosce l'importanza del ruolo sostenuto dalle maree nell'evoluzione del sistema Terra-Luna. Quando la corrente di marea scorre sul fondo, al contorno si crea uno strato turbolento in cui l'energia meccanica del moto dell'acqua viene dissipata in calore d'attrito. Questa energia meccanica proviene dalla rotazione della Terra e dal moto orbitale della Luna. La degradazione di energia meccanica in calore ha come risultato un inesorabile aumento sia della lunghezza del giorno terrestre sia della distanza della Luna dalla Terra. I più recenti calcoli sulla velocità a cui procede questa evoluzione, implicano che il sistema Terra-Luna sia stato alterato in modo fondamentale dall'azione di attrito delle maree. In generale la lunghezza del giorno aumenta di circa due millisecondi al secolo e la Luna si allontana dalla Terra, lungo una spirale, di circa tre centimetri all'anno.

La Luna solleva delle maree sia negli oceani sia nella massa solida della Terra (solleva delle maree anche nell'atmosfera, ma l'effetto di queste maree sul sistema Terra-Luna è così piccolo che non verrà qui discusso). Per ora consideriamo il caso ideale di maree sollevate da un satellite che ruota su un'orbita circolare attorno all'equatore di un pianeta solido elastico (per esempio un pianeta fatto di gomma). La forza gravitazionale deformerebbe il pianeta in un elissoide con l'asse equatoriale più lungo in direzione del satellite. La deformazione deriva dal fatto che l'attrazione gravitazionale del satellite sulla faccia vicina del pianeta è maggiore che su quella lontana. Sebbene la forza gravitazionale diminuisca come l'inverso del quadrato della distanza, l'altezza dei rigonfiamenti di marea varia come l'inverso della terza potenza della distanza tra satellite e pianeta e riflette il fatto che la marea è dovuta alla diversità dell'attrazione del satellite sulle due parti opposte del pianeta. Un osservatore fisso su un punto della superficie del pianeta osserverà due massimi di marea uguali durante ogni rotazione del pianeta. Il pianeta e il satellite ruotano attorno al loro comune centro di massa. La forza centrifuga che risulta da questa rotazione, varia a seconda della distanza tra il centro di massa e un qualsiasi punto del pianeta. A questo effetto, unitamente alla differenza nella forza gravitazionale del satellite che si esercita sul pianeta, è dovuta la formazione dei due rigonfiamenti di marea.

Le forze di richiamo che limitano l'altezza delle maree, sono dovute all'elasticità e alla gravità propria del pianeta. Nei confronti della forza periodica elastica di marea (periodica, quale si risente in un punto fisso del pianeta) il pianeta si comporta come un peso attaccato a una molla e soggetto a una forza periodica. Se il peso viene messo in moto e poi lasciato libero esso oscillerà su e giù alla sua frequenza propria, che dipende solo dalla massa del corpo e dalla rigidità della molla. Se il corpo non è lasciato oscillare liberamente ma è guidato su e giù in modo periodico, il sistema si comporterà diversamente a seconda che la frequenza della forza applicata sia maggiore o minore della sua frequenza propria. Se la frequenza della forza imposta è minore della frequenza propria del sistema, lo spostamento della massa è in fase con la forza, cioè i massimi e i minimi dello spostamento si verificano simultaneamente ai massimi e ai minimi della forza. Se la frequenza imposta è più elevata della frequenza propria, lo spostamento sarà sfasato di mezzo ciclo rispetto alla forza applicata.

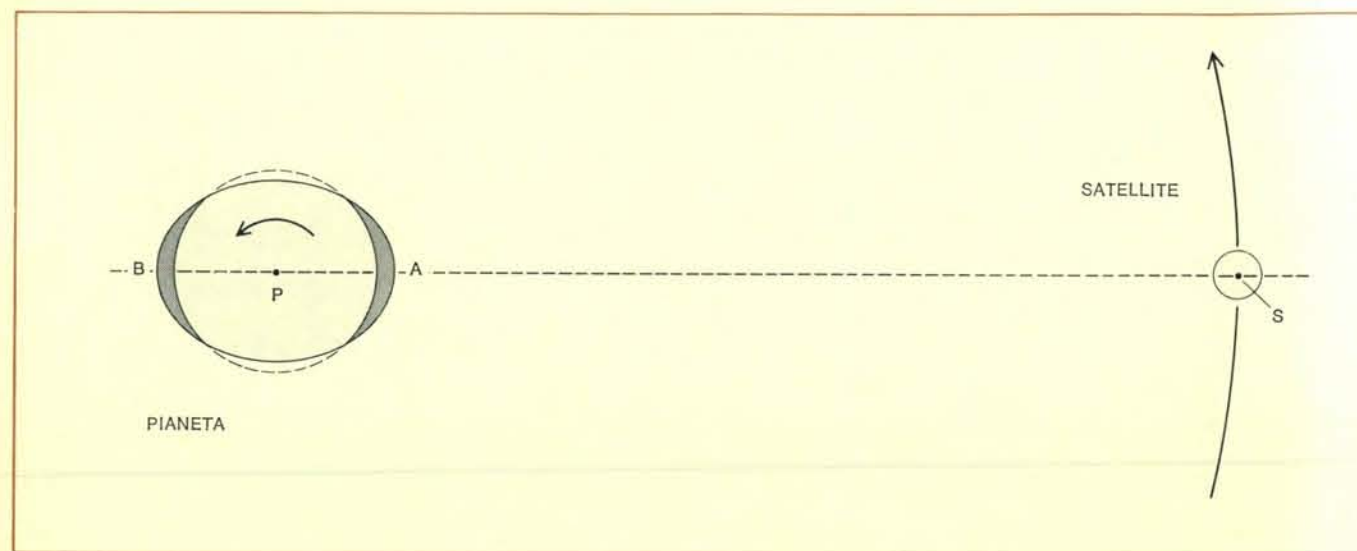
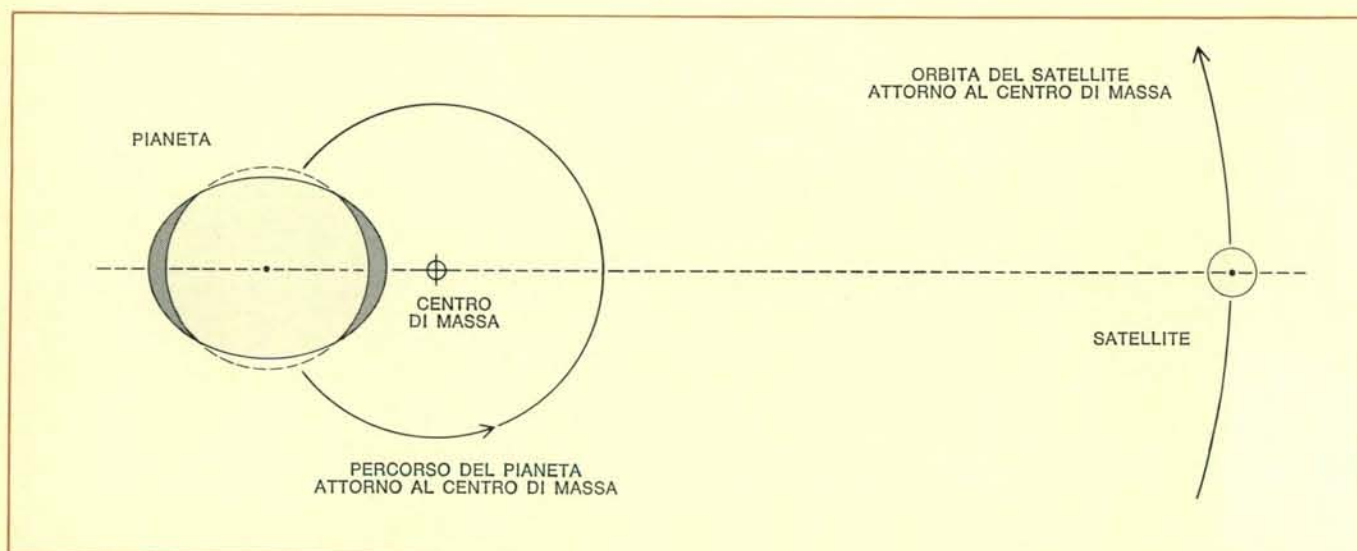
La massa solida della Terra è un sistema più complesso del semplice oscillatore armonico sopra descritto, ed è capace di più oscillazioni simultanee con frequenze diverse. Il periodo di oscillazione più lungo, che si determina in base al tempo impiegato dalle onde sismiche a propagarsi attraverso la Terra, è di circa 55 minuti. Recentemente sono stati fatti studi dettagliati sulle oscillazioni libere della Terra osservandone l'eccitazione causata dai terremoti più intensi. Poiché il periodo delle maree, che è poco meno di 12 ore, è più lungo dei periodi di oscillazione libera, le maree più alte nella massa solida terrestre si riscontrano lungo la retta passante per i centri del sistema Terra-Luna.

L'intervallo in cui può variare il periodo di oscillazione libera degli oceani è dato dal tempo che impiegano le onde di marea ad attraversarli. (Non si tratta però delle « onde di marea » tristemente note per i loro effetti talvolta disastrosi, che sono generate dai terremoti.) Si può calcolare la velocità delle onde di marea moltiplicando l'accelerazione gravitazionale sulla super-

La Luna piena tramonta sull'oceano in bassa marea proprio prima dell'alba di fronte al parco sottomarino John Fitzgerald, a 30 chilometri a sud di San Francisco. La pozza d'acqua in primo piano è stata lasciata dall'alta marea sei ore prima che venisse presa la fotografia, ed è una prova dell'attrazione gravitazionale della Luna a cui sono dovute le maree negli oceani.

ficie terrestre per la profondità dell'oceano e facendone poi la radice quadrata. Per un oceano « tipo » della profondità di quattro chilometri, la velocità è di 0,2 chilometri al secondo. Pertanto un'onda di marea può attraversare, nell'oceano, 10 000 chilometri in una mezza giornata, e i periodi di oscillazione degli oceani sono confrontabili con il periodo forzato di marea. Questa coincidenza, e la forma irregolare del fondo degli oceani, contribuiscono a rendere estremamente complicate le maree oceaniche. Pertanto, quando sia possibile, continueremo a limitare la nostra attenzione alle maree della massa solida terrestre.

In un pianeta reale la dissipazione di energia per l'attrito modifica la deformazione periodica da marea. Ci serviremo ancora una volta dell'analogia tra pianeta e sistema peso-molla. La presenza dell'attrito fa sí che l'allungamento di una molla sia in ritardo di fase rispetto alla forza applicata. Per lo stesso motivo nei punti opposti della Terra si hanno alte maree un po' dopo che questi punti si sono allineati con la direzione del centro di massa del sistema pianeta-satellite. Se il periodo di rotazione del pianeta è piú breve del periodo orbitale del satellite (come nel caso della Terra e della Luna) il risultato di tale ritardo sarà uno spostamento del massimo di marea nel senso della rotazione del pianeta. La posizione asimmetrica dei rigonfiamenti di marea rispetto alla retta dei centri dà origine a una ben precisa coppia, o momento torcente, agente sul satellite. Questa coppia aumenta il momento angolare orbitale del satellite. A ogni azione corrisponde una reazione: una coppia di ugual grandezza ma in senso opposto agisce sul pianeta e frena la sua rotazione. Il risultato complessivo è comunque una coppia poiché il satellite è attratto con maggior forza dal rigonfiamento di marea piú vicino che, in longitudine, è quello piú importante. La coppia di marea varia come l'inverso della sesta potenza della distanza pianeta-satellite.

La coppia di marea opera un trasferimento di momento angolare e di energia dalla rotazione del pianeta all'orbita del satellite. Per fornire alla Luna una certa quantità di momento angolare è necessaria meno energia di quella richiesta per dare la stessa quantità alla Terra. Pertanto, sebbene il momento angolare totale del sistema pianeta-satellite rimanga invariato, co-

Deformazione da marea all'equatore di un pianeta perfettamente elastico dovuta a un satellite che si muove su un'orbita circolare. La forza gravitazionale del satellite deformerà il pianeta in un ellissoide con l'asse maggiore *A-B* diretto verso il satellite. Il sistema è visto dall'alto: *P* indica il polo del pianeta. Il pianeta ruota nello stesso senso in cui si muove il satellite sull'orbita.

Un osservatore fisso in un punto della superficie del pianeta osserverà due rigonfiamenti di marea uguali. I rigonfiamenti sono prodotti dalla differenza nella forza di gravità esercitata dal satellite attraverso il pianeta, unitamente all'accelerazione centrifuga che deriva dalla rotazione del sistema attorno al suo centro di massa. L'accelerazione centrifuga aumenta all'aumentare della distanza del centro di massa man mano che ci si sposta attraverso il pianeta. Il centro di massa del sistema Terra-Luna si trova in effetti a circa 1600 chilometri sotto la superficie terrestre e non al di fuori come è mostrato in figura.

I rigonfiamenti di marea, a causa dell'attrito, sono sfasati con un ritardo di tre gradi rispetto alla retta *P-S* congiungente i centri della Terra e della Luna. Nel caso della Terra, il cui periodo di rotazione è piú breve del periodo orbitale lunare, le maree precedono la Luna a causa della rotazione terrestre. Le maree della massa solida terrestre sono in nero, quelle dei mari in colore.

Man mano che la Terra trasferisce parte del suo momento angolare alla Luna questa si allontana dalla Terra su una spirale. L'orbita lunare è un'ellisse. L'aumento impulsivo di momento angolare al perigeo trasforma l'orbita in un'ellisse piú allargata. La Luna, se non ci fossero ulteriori cambiamenti di momento angolare, al perigeo ripasserebbe per lo stesso punto precedente.

me risultato delle perdite per attrito nel pianeta la sua energia meccanica totale diminuisce. Questa perdita di energia per attrito, piú il trasferimento di momento angolare, fa sí che la Luna acquisti momento angolare a spese della rotazione della Terra. La direzione del flusso di momento angolare è determinata dalla lunghezza relativa del mese e del giorno.

Sull'eccentricità, o forma ovale, dell'orbita di un satellite influisce l'attrito delle maree. Immaginiamo un satellite che ruota su un'orbita ellittica attorno a un pianeta e supponiamo che il trasferimento di momento angolare dalla rotazione del pianeta all'orbita del satellite avvenga esattamente in due impulsi: uno grande al pericentro (il punto di minore distanza) e uno piú piccolo all'apocentro (il punto di maggior separazione). L'aumento impulsivo di momento angolare al pericentro non altererà la posizione pericentrale ma aumenterà la distanza dell'apocentro. Analogamente l'aumento impulsivo di momento angolare all'apocentro non influenzerà la posizione dell'apocentro ma tenderà ad aumentare la distanza pericentrale. Poiché la coppia di marea varia come l'inverso della sesta potenza della distanza pianeta-satellite, l'eccentricità orbitale aumenterà in quanto è maggiore l'aumento di momento angolare in prossimità del pericentro di quello in prossimità dell'apocentro.

Le maree sollevate dal pianeta sul satellite tendono a diminuire l'eccentricità dell'orbita. In tutti i casi in cui questo effetto è importante, queste stesse maree « freneranno » la rotazione del satellite fino ad avere una rotazione sincrona, cioè finché il periodo di rotazione del satellite attorno al proprio asse risulta uguale al periodo di rivoluzione attorno al pianeta e il satellite presenta al pianeta sempre la stessa faccia. In questo caso i rigonfiamenti di marea sul satellite sono puramente radiali, lungo la retta dei centri del sistema pianeta-satellite, e non produrranno una coppia di marea. Anche in questo caso l'energia di marea viene dissipata in calore per le oscillazioni nell'altezza delle maree della massa solida del pianeta, in seguito alla variazione della distanza pianeta-satellite. L'energia dissipata come calore viene attinta a spese dell'energia orbitale del satellite e poiché, a parità di momento angolare, l'orbita di piú bassa energia è una circonferenza, queste maree tendono a rendere piú circolare l'orbita del satellite.

Poiché la coppia di marea varia come l'inverso della sesta potenza della distanza, il suo effetto è sensibile solo a distanze piuttosto piccole, il che limita la sua importanza nella dinamica del sistema solare. Le orbite dei pianeti non sono state alterate in modo apprezzabile dalle maree sollevate dai pianeti stessi sul Sole. Le maree sollevate dal Sole hanno invece influenzato notevolmente la rotazione dei due pianeti piú interni, Mercurio e Venere. Piú modesto è stato il loro effetto sulla rotazione della Terra, e non hanno avuto alcun effetto apprezzabile sugli altri pianeti. L'attrito delle maree è piú importante nei sistemi di satelliti che non nel sistema planetario poiché vi sono distanze minori. Pertanto le maree sollevate dalla Terra sulla Luna e da Giove e Saturno sui loro grandi satelliti interni, hanno portato questi satelliti a una rotazione sincrona. L'evoluzione dovuta all'attrito delle maree sulle orbite di satelliti, che non siano la Luna, non è stata osservata sperimentalmente, ma ci sono molti argomenti teorici che fanno ritenere possibile un qualche cambiamento indotto dalle maree.

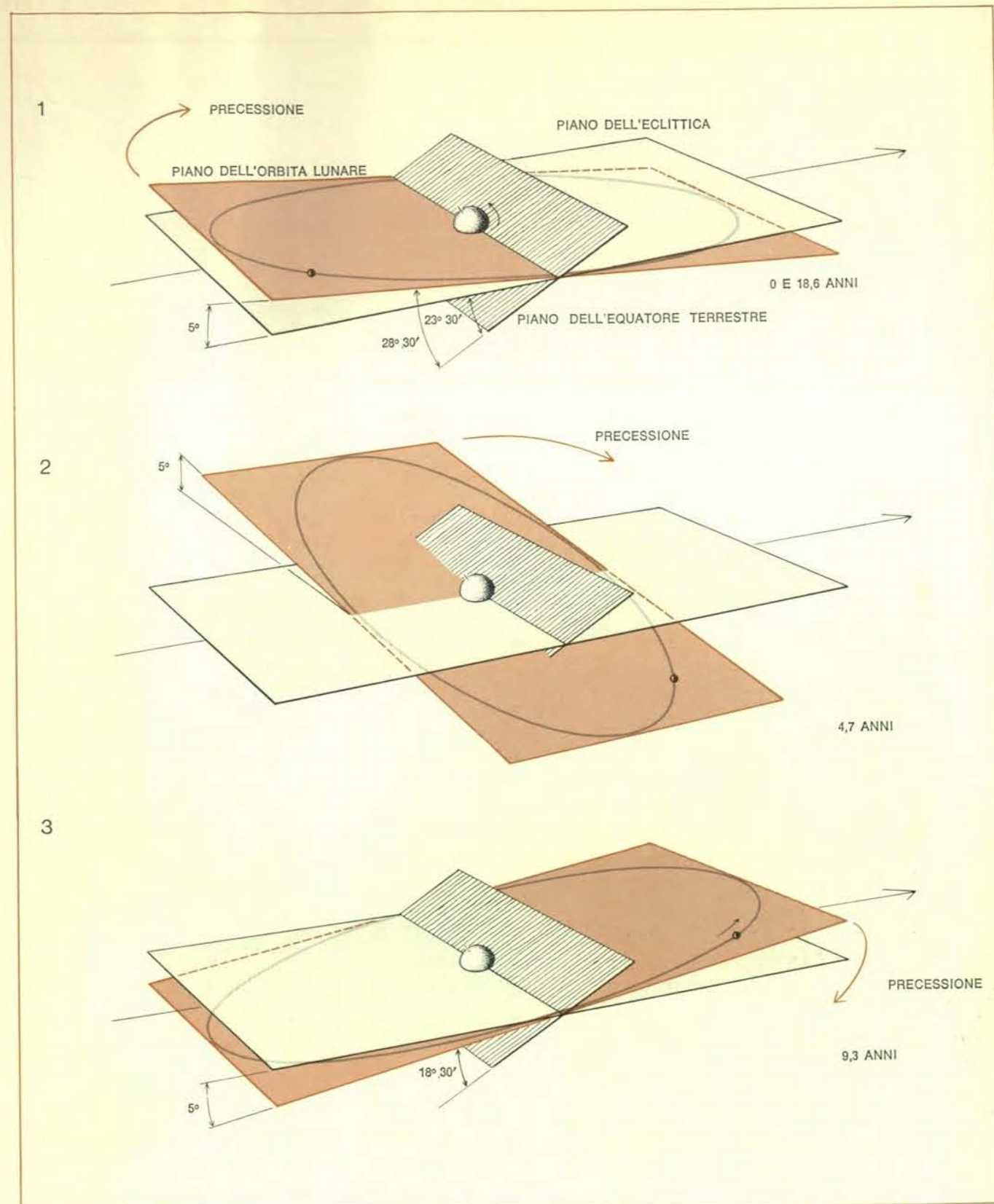
La rotazione sincrona della Luna è la conseguenza osservabile dell'attrito di marea. Per primo, nel 1754, Immanuel Kant pensò che l'attrito di marea potesse spiegare la rotazione della Luna. Tenendo conto dell'attuale distanza dalla Terra, la diminuzione di velocità di rotazione da una rotazione iniziale molto piú veloce, dovrebbe essere avvenuta in non piú di 10 milioni di anni, un istante soltanto nella scala del tempo geologico. La stabilità del sincronismo della rotazione lunare è dovuta alla figura irregolare della Luna, leggermente allungata verso la Terra. Questa stabilità evita che il collegamento sincrono venga rotto da collisioni con la Luna di comete o di asteroidi.

Non è possibile fare delle misure dirette della velocità con cui si allarga l'orbita lunare, sebbene la messa in opera di un riflettore laser sulla Luna dia qualche speranza per il futuro (si veda l'articolo *Il riflettore laser lunare* di James E. Faller e E. Joseph Wampler, in « Le Scienze », n. 22, giugno 1970). Sono stati invece usati due metodi meno diretti, basati sulla relazione tra raggio e periodo dell'orbita lunare.

Il primo di questi metodi si basa sulle « recenti » (degli ultimi 250 anni) osservazioni della longitudine del Sole, di Mercurio e della Luna, come si vedono sullo sfondo delle stelle lontane. Le longitudini osservate del Sole e di Mercurio vengono confrontate con le longitudini previste teoricamente, basandosi su una velocità di rotazione costante della Terra. Le differenze tra i due insiemi di valori della longitudine permettono di determinare le irregolarità nella velocità di rotazione della Terra; alcune di queste sono dovute a cause che non hanno nulla a che vedere con la marea, come cambiamenti nel momento di inerzia della Terra e il trasferimento di momento angolare tra nucleo e mantello per la ridistribuzione delle masse all'interno della Terra. Se si sottraggono gli effetti delle variazioni nella velocità di rotazione terrestre dalle differenze nella longitudine della Luna, si determina univocamente la velocità con cui aumenta il periodo orbitale lunare.

Il secondo metodo per misurare la velocità con cui si sta espandendo l'orbita lunare riguarda lo studio delle registrazioni delle antiche eclissi solari. Tali registrazioni furono utilizzate per la prima volta da Edmund Halley nel 1693. Il metodo ha il vantaggio di utilizzare un intervallo di tempo piú lungo di quello del metodo basato solo sulle osservazioni recenti, ma è soggetto alle ambiguità e alle inesattezze delle antiche registrazioni. In un recente studio Robert R. Newton della Johns Hopkins University, concludeva che in alcune registrazioni delle antiche eclissi si risente l'influenza dei loro stessi autori, desiderosi di aumentare la loro importanza storica o letteraria. Noi ci baseremo sui risultati ottenuti dalle osservazioni « recenti » sebbene siano generalmente ancora oggetto di discussione.

Come ho già detto, queste osservazioni comportano un allargamento dell'orbita lunare di circa tre centimetri all'anno e un aumento di circa 20 microsecondi all'anno nella durata del giorno. Il valore dell'angolo associato al ritardo di marea rispetto alla retta dei centri Terra-Luna è, approssimativamente, di tre gradi. La velocità di dissipazione dell'energia da marea è di circa $2,6 \times 10^{12}$ watt, valore vicino al consumo di potenza dell'intero mondo, e circa il 15 % del calore totale che fluisce dall'interno della Terra.

Se facciamo l'ipotesi che il valore attuale dell'angolo del ritardo di marea rappresenti anche il suo valore nel passato, possiamo estrapolare, all'indietro nel tempo, l'orbita lunare e dedurre in che epoca (se mai ci fu) la Luna sia stata vicina alla Terra. Questo modo di procedere porta all'ina-

Il piano dell'orbita lunare precede, a causa della forza gravitazionale del Sole, con un periodo di 18,6 anni. Il piano orbitale della Luna (*in colore scuro*) è inclinato di cinque gradi sull'eclittica (piano dell'orbita terrestre); il piano dell'equatore terrestre (*area tratteggiata*) è inclinato di 23° 30′ sull'eclittica. La forza esercitata dal Sole fa ruotare il piano orbitale della Luna nello spazio mantenendo costante l'inclinazione (cinque gradi) sull'eclittica. Ogni 18,6 anni il piano dell'equatore terrestre e il piano dell'orbita lunare si troveranno inclinati da parti opposte (*in alto*) rispetto al piano dell'eclittica (*freccia lunga*). L'angolo tra questi è di 28° 30′ gradi ed è l'angolo maggiore che si possa avere. In 4,7 anni il piano orbitale della Luna avrà fatto un quarto della rotazione e sarà ad angolo retto con la posizione precedente (*al centro*). In 9,3 anni il piano orbitale lunare sarà arrivato a metà del suo ciclo di precessione (*in basso*). Il piano dell'equatore terrestre e il piano dell'orbita lunare saranno entrambi inclinati dalla stessa parte sopra l'eclittica e l'angolo da essi formato, il piú piccolo, sarà di 18° 30′. In 18,6 anni il piano orbitale della Luna sarà tornato nella posizione iniziale da dove ripeterà il ciclo di precessione.

spettato risultato che la Luna doveva trovarsi vicina meno di due miliardi di anni fa. Generalmente si ritiene che l'età dei pianeti, compresa la Terra e la Luna, sia di 4,6 miliardi di anni. Si potrebbe pensare che qualora la Luna si fosse trovata vicina alla Terra, avrebbe dovuto esserlo fin dall'inizio della storia del sistema Terra-Luna. Ora c'è una qualche via per eliminare il disaccordo tra le due date? La via piú plausibile sarebbe quella di scartare l'ipotesi che la fase nel ritardo di marea sia rimasta costante durante tutto il periodo geologico. Può sembrare certamente temerario estrapolare all'indietro per due miliardi di anni basandosi su un parametro che è stato determinato da dati che risalgono a non piú di 4000 anni, cioè l'intervallo di tempo ricoperto dalle antiche registrazioni di eclissi solari. La nostra fiducia nell'applicabilità dell'attuale ritardo di fase di marea è stata però rafforzata da una notevole scoperta paleontologica. Nel 1963 John W. Wells della Cornell University fece l'ipotesi che gli strati di accrescimento annuale dei coralli fossili siano costituiti da formazioni di accrescimento giornaliero. Tenendo conto dell'accrescimento giornaliero in ogni strato annuale nei coralli fossili e del numero di giorni in un anno si è determinato tutto il cammino a ritroso fino al periodo del Devoniano medio che risale a circa 380 milioni di anni fa. I dati oggi disponibili sono in accordo con un ritardo costante di fase nella marea di tre gradi per tutto il periodo degli ultimi 380 milioni di anni. Per quanto estremamente interessanti, i dati sui coralli ci portano indietro nel tempo solo fino all'epoca in cui la durata del giorno era di 22 ore e la distanza della Luna dalla Terra di 58 raggi terrestri, invece degli attuali 60,25. Per valutare cosa implichi un'ulteriore estrapolazione all'indietro è necessario individuare la regione in cui si verifica la dissipazione di energia da marea.

Sebbene i dati astronomici rivelino la velocità totale di perdita di energia della Terra, non forniscono informazioni sul luogo in cui si verifica la dissipazione. Il primo problema è: la dissipazione dell'energia nelle maree si verifica principalmente negli oceani o nella massa solida della Terra? Si sono usati tre metodi per calcolare la perdita totale di energia da marea negli oceani e tutti e tre fanno pensare che la maggior parte della dissipazione (se non tutta) avvenga nelle acque basse. Il metodo piú grossolano è quello di consultare le carte delle maree che mostrano la deformazione degli oceani dovuta alle maree. Dalla forma della deformazione di marea si può calcolare direttamente la coppia agente sulla Luna.

Due metodi piú accurati furono proposti nel 1919 da sir Geoffrey Taylor. Entrambi i metodi si basano sul fatto che negli oceani profondi le correnti di marea sono cosí lente che ben difficilmente potrebbero dissipare energia. Pertanto la dissipazione di energia da marea dovrebbe essere limitata alle acque basse dove le correnti di marea aumentano fino a raggiungere velocità molto piú grandi. Il primo metodo di Taylor è quello di valutare le correnti di marea nelle acque basse e poi calcolare direttamente la dissipazione di energia per attrito negli strati turbolenti al contorno, lungo il fondo oceanico. Questo metodo risente molto di eventuali errori nelle velocità di marea poiché la velocità a cui viene dissipata l'energia è proporzionale al cubo della velocità delle correnti di marea. In un primo tempo questo metodo fu usato per stabilire che, come era previsto, piú della metà della dissipazione totale avveniva nel mare di Bering. In seguito a ulteriori calcoli si modificarono in meno i valori usati per le correnti di marea. Adesso si sostiene che il mare di Bering è responsabile solo del 10 per cento della perdita totale di energia da marea. Il secondo metodo di Taylor è quello che generalmente si preferisce. Questo metodo richiede che si conosca sia l'altezza che il flusso dell'acqua quando entra nei mari poco profondi. Dall'altezza della marea si può calcolare la pressione a ogni profondità e si può valutare il lavoro complessivo fatto dall'acqua entrando e uscendo dai mari poco profondi. Una serie di calcoli di questo tipo fatta da Gaylord R. Miller, allora all'Università della California a San Diego, mostra che le acque basse rendono conto di circa i due terzi della velocità di dissipazione d'energia stabilita con metodi astronomici.

Se noi accettiamo l'ipotesi che l'energia di marea è dissipata principalmente nei mari poco profondi, allora non ci sono basi sufficienti per fare l'ipotesi che il ritardo di fase nella marea sia rimasto costante durante gli ultimi due miliardi di anni. Prove della deriva dei continenti e dell'allargamento del fondo marino stanno a indicare che soltanto 500 milioni di anni fa la configurazione degli oceani e dei continenti era molto diversa. Questo sembrerebbe spiegare bene il fattore due o tre di cui l'attuale ritardo di fase dovrebbe superare il suo valor medio nel passato, per poter conciliare la velocità di evoluzione di marea con l'età del sistema Terra-Luna.

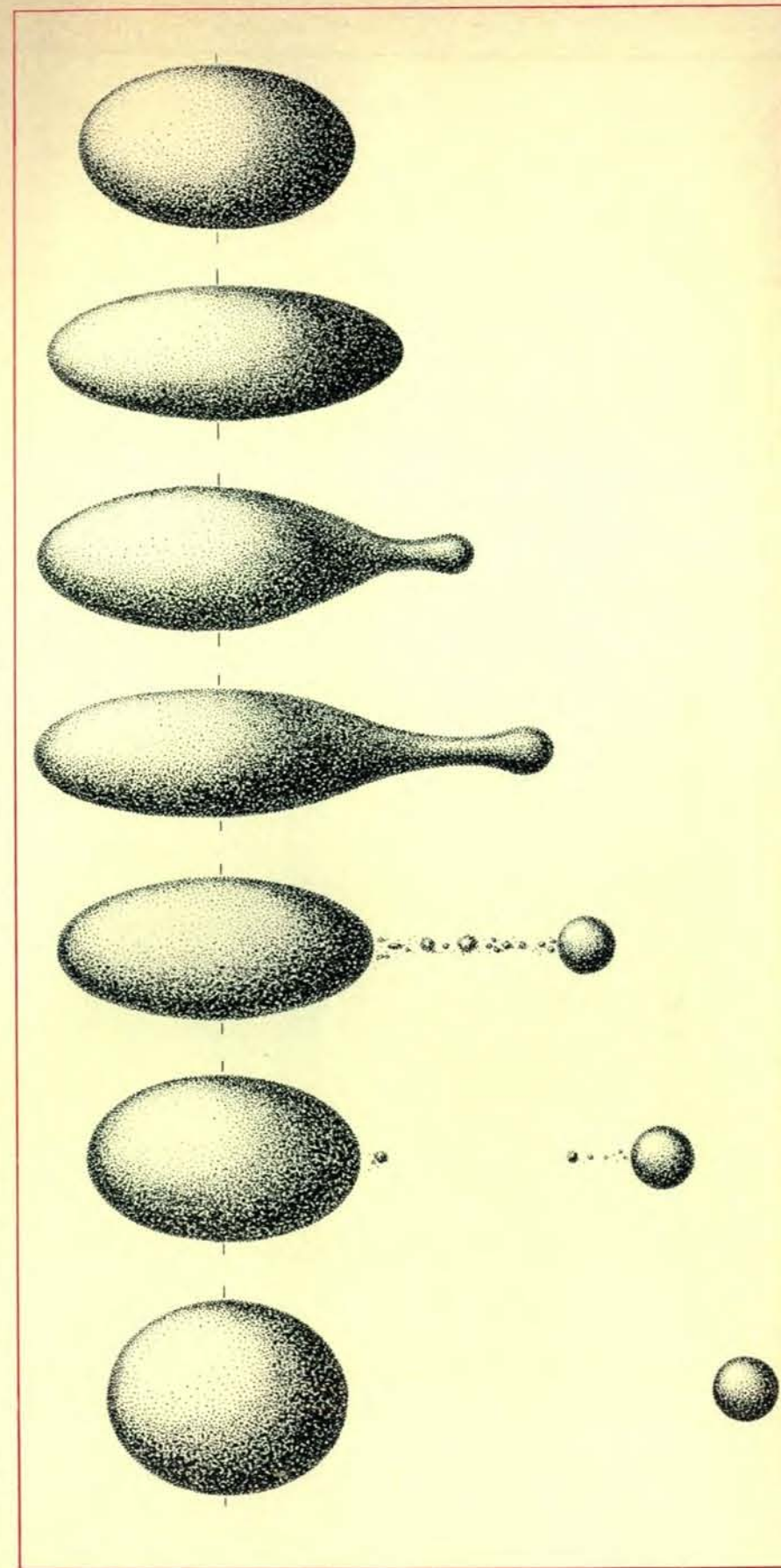
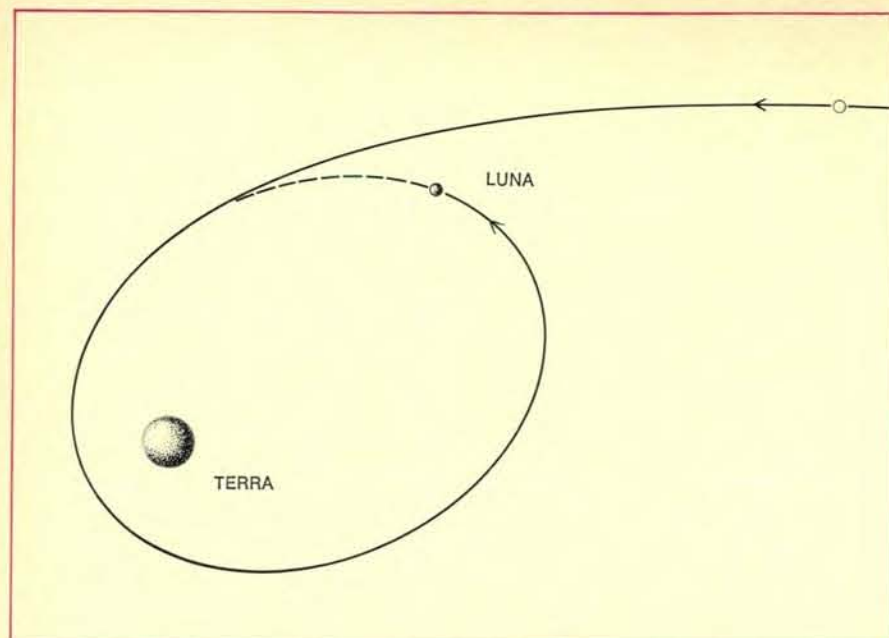
La dinamica del sistema Terra-Luna è complicata dall'influenza del Sole. Attualmente il piano dell'orbita lunare è inclinato di cinque gradi rispetto al piano dell'eclittica (il piano dell'orbita terrestre) e l'equatore terrestre è inclinato sull'eclittica di 23° 30′. La forza esercitata dal Sole fa ruotare il piano orbitale della Luna nello spazio mantenendo costante l'inclinazione sull'eclittica. Il periodo di precessione dell'orbita lunare è di 18,6 anni. L'attrazione complessiva della Luna e del Sole in direzione della convessità rotazionale della Terra, obbliga l'asse terrestre a precedere col periodo, molto piú lungo, di 27 000 anni. L'attrazione della Luna in direzione dell'appiattimento rotazionale della Terra è insignificante e l'orbita lunare è controllata dal Sole. Pertanto l'inclinazione dell'orbita lunare sull'equatore terrestre varia tra 18° 30′ e 28° 30′ con un periodo di 18,6 anni.

Nel passato la Luna era piú vicina alla Terra e maggiore era il rigonfiamento equatoriale terrestre. Tutti e due i fattori accentuavano l'intensità dell'interazione tra appiattimento della Terra e orbita lunare. Da semplici calcoli si vede che se la distanza della Luna fosse stata inferiore a 10 raggi terrestri, questa interazione avrebbe prevalso sull'interazione tra orbita lunare e Sole. Per una distanza inferiore ai 10 raggi terrestri, l'inclinazione dell'orbita lunare sul piano equatoriale terrestre sarebbe rimasta costante. Man mano che l'orbita lunare e l'equatore terrestre precedevano, l'angolo che l'equatore formava con l'eclittica e l'inclinazione dell'orbita lunare sull'eclittica sarebbero variati periodicamente.

Armati di una certa conoscenza sull'azione dell'attrito di marea e della dinamica del corpo rigido per il sistema Terra-Luna-Sole, è possibile capire la storia del sistema Terra-Luna. Calcoli simili a quelli che ho portato a conclusione parecchi anni fa, sono stati eseguiti da molte altre persone partendo dal lavoro pionieristico di George Darwin (il figlio di Charles Darwin) fatto nel XIX secolo. Fra i ricercatori piú recenti ci sono Horst Gerstenkorn, William M. Kaula, Gordon J. F. MacDonald, S. Fred Singer e Louis B. Slichter. Da tutti questi calcoli si può vedere che la Luna non si è mai mossa su un'orbita equatoriale. L'inclinazione orbitale della Luna rispetto all'equatore terrestre avrebbe dovuto superare i 10 gradi qualora, nel passato, la Luna si fosse trovata a meno di 10 raggi terrestri. Nella posizione di maggior vicinanza della Luna, la durata del giorno avrebbe dovuto essere di circa cinque ore.

Ci muoviamo su basi meno sicure quando si va a considerare la variazione, in passato, dell'eccentricità dell'orbita lunare. Il valore nel ritardo di fase delle maree sulla Luna non è ancora noto. (Ricordiamo che le maree sollevate sulla Luna dalla Terra tendono a diminuire l'eccentricità). Anche se la dissipazione di marea sulla Luna è quasi uguale alla dissipazione sulla Terra, l'effetto dominante sull'eccentricità dell'orbita lunare sarà quello delle maree terrestri. Infatti la mancanza di oceani sulla Luna fa pensare che il suo ritardo di fase nelle maree sia piú piccolo di quello terrestre. Sembra perciò molto probabile che l'eccentricità della Luna vada attualmente aumentando e che in tempi non molto lontani fosse anche minore.

I risultati dei calcoli di cui ho parlato non sono molto contrastanti tra loro. Una teoria sull'origine della Luna dipende molto dal punto in cui si decide che abbia effettivamente avuto origine la Luna, lungo il percorso d'evoluzione calcolato teoricamente. Se ci fosse un qualche segno facilmente distinguibile messo in evidenza dal percorso d'evoluzione, ci sarebbe sicuramente maggior accordo sull'origine della Luna. In assenza di tale segno, si è avanzata una varietà sconcertante di ipotesi. Le teorie sull'origine della Luna si dividono, naturalmente, in tre categorie: fissione, cattura e formazione binaria.

L'idea che la Luna si sia separata dalla Terra, fu avanzata originariamente da George Darwin. La versione moderna di questa ipotesi si fonda sull'idea di un'instabilità rotazionale della Terra primordiale; fu questa instabilità a causare la suddivisione della Terra nell'attuale sistema Terra-Luna. Questa classe di teorie deve superare difficoltà enormi. Innanzitutto il fatto che, nel momento in cui la Luna si è separata, il giorno terrestre avrebbe dovuto essere proprio di circa cinque ore. Per indurre un'instabilità rotazionale è necessario un periodo iniziale prossimo a 2,6 ore. I sostenitori dell'ipotesi della fissione dovrebbero spiegare la scomparsa di circa metà del momento angolare iniziale del sistema Terra-Luna; e questo non si è dimostrato un compito semplice. L'ipotesi della fissione non riesce anche a spiegare facilmente l'attuale inclinazione di cinque gradi dell'orbita lunare sul

Secondo l'ipotesi della fissione si suppone che la Terra inizialmente ruotasse con un periodo di 2,6 ore. Quando il ferro si concentrò dal mantello nel nucleo, il momento d'inerzia della Terra diminuí e aumentò la sua rotazione. Il corpo divenne instabile e la sua forma passò da quella di uno sferoide schiacciato (*in alto*) a quella di una pera (*al centro*). Alla fine il collo della pera si ruppe e si formò la Luna (*in basso*).

Secondo l'ipotesi della cattura, la Luna, che un tempo andava liberamente alla deriva nello spazio, fu imprigionata dal campo gravitazionale terrestre e costretta a ruotare su un'orbita chiusa. L'energia in piú che essa aveva si sarebbe dissipata nell'attrito di marea e nelle collisioni con i detriti che in quell'epoca orbitavano attorno alla Terra.

piano dell'eclittica. Dai calcoli sull'evoluzione, l'orbita lunare avrebbe dovuto essere inclinata di almeno 10 gradi sull'equatore terrestre quando i due corpi si trovavano uno vicino all'altro. La fissione avrebbe portato a un'orbita iniziale equatoriale. Dai conti si vede che un'orbita iniziale equatoriale si sarebbe poi trasformata in un'orbita posta nel piano dell'eclittica all'attuale distanza tra Terra e Luna.

Le teorie sull'origine della Luna per cattura hanno anch'esse i loro problemi. Secondo queste teorie la Luna una volta era un pianeta indipendente che fu catturato dal campo gravitazionale terrestre e messo in rotazione su una orbita lunare. I problemi relativi alle teorie della cattura sono in gran parte dovuti alla mancanza di plausibilità del processo di cattura, secondo cui la velocità di una Luna inizialmente libera avrebbe dovuto diminuire per un qualche tipo di processo dissipativo. Tra le sorgenti di dissipazione che avrebbero portato alla cattura, si è pensato all'attrito da marea e a collisioni con materiale già sull'orbita terrestre. Perdite per attrito di marea nel corso di un unico incontro a distanza ravvicinata tra Terra e Luna sarebbero molto piccole; perdite di energia per collisioni con materiale orbitante, richiederebbero che una notevole frazione della massa lunare fosse già in orbita attorno alla Terra.

Questo ci porta all'unica ipotesi realmente nuova sull'origine della Luna apparsa nel corso dell'ultima metà di questo secolo. Essa fu concepita da Gerstenkorn che, mentre ricostruiva, a ritroso nel tempo, l'orbita di separazione minima tra Terra e Luna, trovò che la Luna, ancor prima, avrebbe dovuto muoversi su un'orbita eccentrica molto inclinata. Il ragionamento fatto da Gerstenkorn è che la Luna inizialmente sia stata catturata su quest'orbita e che successivamente l'attrito di marea abbia fatto diminuire l'eccentricità e l'inclinazione orbitale e abbia fatto aumentare il raggio fino al valore odierno. Per quanto ingegnosa, l'idea di Gerstenkorn non ha mai incontrato il favore generale. Uno degli ostacoli che gli si presentano è l'improbabilità del processo di cattura, processo che Gerstenkorn attribuisce alla dissipazione da marea nel corpo lunare. Perché tramite questo processo ci sia cattura è necessario che la Luna si avvicini alla Terra a una velocità relativa di meno di un chilometro al secondo e a non piú di due raggi terrestri dalla superficie della Terra. Ciò che preoccupa è che la Luna, nel punto di maggior vicinanza, non dovrebbe superare il limite di Roche di 2,86 raggi terrestri. A questa distanza la forza gravitazionale di marea della Terra supererebbe la gravità interna lunare e farebbe a pezzi la Luna. Non è chiaro se la forza elastica lunare sarebbe sufficiente o meno a evitarne la distruzione nel breve periodo che la Luna passa alla distanza di Roche.

L'ipotesi della formazione della Luna da materiale orbitante attorno alla Terra, non affronta il problema dinamico reale. Non c'è dubbio tuttavia che la composizione della Luna, che ha una densità di 3,3 grammi al centimetro cubo, differisca notevolmente dalla composizione della Terra, la cui densità media è di 5,5 grammi al centimetro cubo. I fautori della teoria della fissione ricorrono, a sostegno della loro ipotesi, alla somiglianza tra la densità del mantello terrestre e quella del mantello della Luna. I sostenitori della teoria della cattura hanno invece utilizzato la diversa densità per sostenere che la Luna e la Terra non hanno avuto origine dallo stesso nucleo di materia. Malgrado le difficoltà dovute alle differenze chimiche tra Terra e Luna (che riguarderebbero soprattutto la molto minor abbondanza di ferro sulla Luna), preferisco l'ipotesi della formazione della Luna da materiale in orbita attorno alla Terra. Fino a questo momento non c'è nessun motivo autorevole per scegliere, come luogo in cui si formò la Luna, una distanza dalla Terra piuttosto che un'altra.

Dopo tutte queste discussioni sulla storia del sistema Terra-Luna, è opportuno descrivere brevemente che cosa ci riserva il futuro. Vale la pena di dire che tutte le previsioni per il futuro si basano sull'ipotesi che il Sole non debba subire nessun evento catastrofico, come un'esplosione di supernova, prima che tali cambiamenti abbiano avuto luogo.

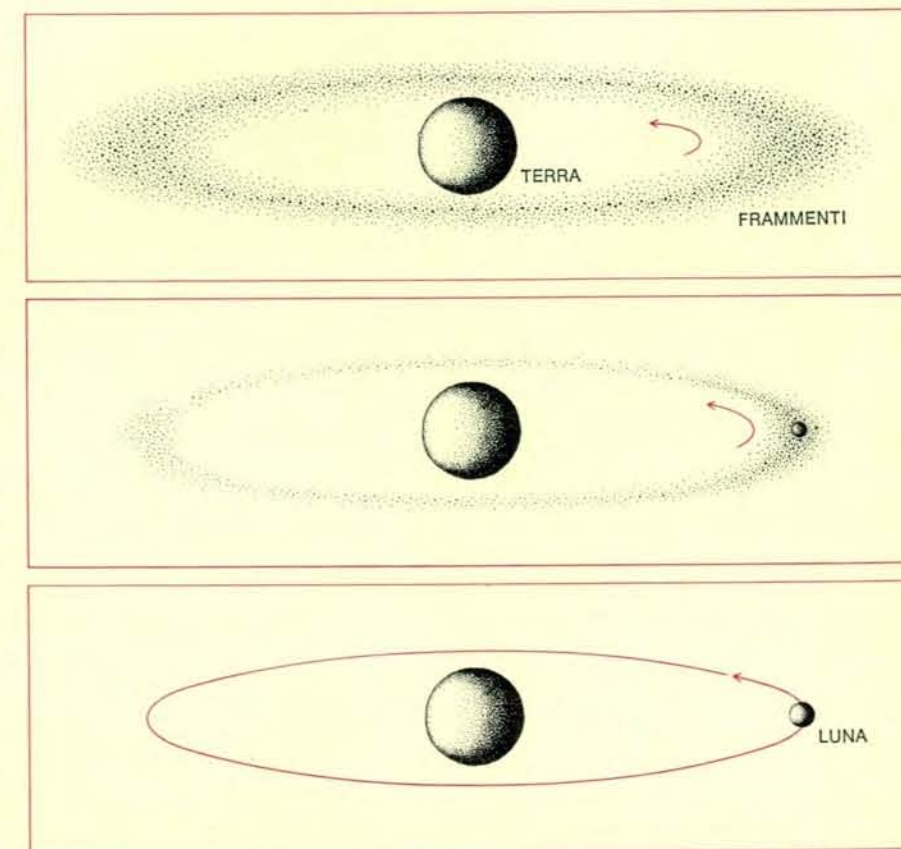
Dai calcoli si vede che la Luna continuerà ad allontanarsi dalla Terra fino a quando avrà raggiunto una distanza di circa 75 raggi terrestri. A questo punto il giorno terrestre e il mese lunare avranno la stessa durata. L'eventualità piú probabile è che, una volta che giorno e mese siano uguali, il sincronismo tra rotazione terrestre e rivoluzione della Luna si stabilizzi per sempre a causa della forma della Terra che dovrebbe essere leggermente allungata verso la Luna. L'asse di minor inerzia della Terra dovrebbe puntare verso la Luna e analogamente la Luna dovrebbe ora mantenere il suo asse di minor inerzia in direzione della Terra. Tale connessione dovrebbe mantenersi anche se le maree solari tendessero a interrompere la rotazione terrestre. La parte maggiore del momento angolare del sistema Terra-Luna dovrebbe appartenere all'orbita lunare. La Terra risentirà di un momento torcente sia da parte della Luna che del Sole. Il Sole, nella sua azione che tende a interrompere la rotazione terrestre, sottrarrà momento angolare al sistema Terra-Luna; la Luna comunicherà pertanto parte del suo momento angolare alla Terra, quanto basta a compensare l'azione del Sole, e forse qualcosa di piú. Il risultato sarà che la Terra ruoterà piú velocemente e la Luna si avvicinerà alla Terra e diminuirà il suo momento d'inerzia rispetto al centro di massa del sistema Terra-Luna.

La possibilità che la Luna venga ancora una volta a trovarsi alla distanza di pochi raggi terrestri soltanto, merita qualche commento supplementare. Si può calcolare che quando la Terra ruotava con un periodo di cinque ore sotto una Luna con periodo orbitale solo di poco piú lungo, avrebbero dovuto sollevarsi maree dell'altezza di parecchi chilometri. La dissipazione d'energia nell'attrito di marea avrebbe superato il riscaldamento solare della Terra; quasi tutta l'acqua degli oceani sarebbe evaporata e c'è anche la possibilità che il mantello terrestre fosse in buona parte fuso. Questa intensa attività si sarebbe limitata al breve periodo di tempo in cui la Luna rimase vicino alla Terra, forse qualche centinaio di anni a distanze inferiori ai sei raggi terrestri. Se questo evento si verificò ai primordi della storia della Terra l'evoluzione successiva della superficie terrestre potrebbe averne cancellato ogni traccia dalla storia geologica. Potrebbe anche darsi che sia la Luna, in virtú della sua superficie piú stabile, il posto dove cercare la prova di tale evento catastrofico.

Il rientro delle missioni Apollo atterrate sulla Luna ha già fatto enormemente aumentare le nostre conoscenze sull'origine della Luna. È troppo presto tuttavia per dire che siamo in grado di fare una distinzione tra le tre teorie rivali sull'origine della Luna. Ci sono però degli indizi nei dati ottenuti finora che hanno attinenza piuttosto diretta con tutte queste ipotesi.

Dalle analisi sulle rocce riportate da *Apollo 11*, sembrerebbe che esse si siano cristallizzate 3,6 miliardi di anni fa; analisi analoghe sulle rocce di *Apollo 12* mostrano invece che esse si sono cristallizzate soltanto 3,25 miliardi di anni fa. Queste epoche di cristallizzazione sono sostanzialmente diverse ed escludono che su tutta la Luna i mari si siano riempiti simultaneamente. Si era anche pensato che l'inondazione dei mari lunari fosse dovuta a un processo di fusione per l'attrito di marea in seguito alla cattura della Luna da parte della Terra. Questa idea può essere ora scartata.

Prima delle missioni Apollo si erano assegnate età relative a varie aree della Luna basandosi sul conteggio dei crateri all'interno di tali aree. Il ragionamento che si faceva era che quanti piú crateri c'erano in un'area tanto maggiore avrebbe dovuto essere la sua età poiché, per accumulare un numero piú grande di crateri, avrebbe dovuto esistere da piú tempo. Dato che non si conosce il flusso dei corpi che in passato cadevano sulla Luna non era possibile dedurne l'età assoluta. La determinazione radioattiva dell'età dei campioni portati a terra ha permesso di assegnare, per la prima volta, età assolute a porzioni della superficie lunare. Sulla base delle età cosí determinate si è concluso che il flusso dei corpi che cadevano sulla Luna è diminuito di circa tre ordini di grandezza (1000 volte) durante il primo miliardo di anni dalla formazione della Luna. Siamo costretti a fare questa conclusione poiché il flusso degli urti sulle zone montagnose è di tre ordini di grandezza superiore al flusso a cui sono dovuti i crateri della zona inferiore del Mare della Tranquillità (la zona dell'*Apollo 11*). Poiché l'età delle zone montagnose deve essere inferiore ai 4,6 miliardi di anni (l'età probabile della Luna), esse hanno oltre un miliardo di anni in piú del Mare della Tranquillità. L'elevato ritmo di bombardamento iniziale è sicuramente connesso con il processo con cui corpi piú piccoli si sono raggruppati a formare la Luna.

Analisi dei campioni lunari mostrano che il materiale proveniente dai mari, all'epoca in cui si è formata la Luna, era chimicamente spezzettato. Non sappiamo ancora quanto di questo spezzettamento si sia verificato nello spazio prima della formazione della Luna e quanto sia dovuto a una successiva frattura interna nel corpo lunare. Il problema è probabilmente connesso con le differenti composizioni della Terra e della Luna. La soluzione di questo problema costituirebbe un importante passo avanti. Abbiamo anche imparato che la composizione delle rocce e del suolo non può considerarsi rappresentativa della composizione complessiva della Luna (si veda l'articolo *Il suolo lunare* di John A. Wood, in « Le Scienze », n. 27, novembre 1970).

Secondo l'ipotesi dell'accrescimento, la Luna si sarebbe formata dopo la Terra su un'orbita terrestre, da materiale diverso. Per ora non c'è nessun motivo per scegliere, come luogo in cui si formò la Luna, una distanza dalla Terra piuttosto di un'altra.

Struttura e storia di un'antica proteina

Per ossidare le molecole dei cibi, tutti gli organismi, dai lieviti all'uomo, hanno bisogno del citocromo c. Le differenze esistenti in questa proteina da specie a specie documentano 1,2 miliardi di anni di evoluzione molecolare

di Richard E. Dickerson

Fra 1,5 e 2 miliardi di anni fa, si è avuta una profonda trasformazione in alcuni degli organismi unicellulari che allora popolavano il nostro pianeta, una trasformazione che col tempo avrebbe contribuito all'origine degli organismi multicellulari. L'evoluzione infatti mise a punto un meccanismo capace di captare l'energia dei cibi in misura molto maggiore che in precedenza.

Uno dei componenti centrali del nuovo sistema metabolico era il citocromo c, una proteina i cui discendenti possono essere trovati oggi in ogni cellula vivente che possieda un nucleo.

Studiando il citocromo c estratto da vari organismi, è stato possibile determinare con quale velocità la proteina si è evoluta dal momento in cui le piante e gli animali si sono separati in due distinti regni e ricavare come data approssimativa per questo evento 1,2 miliardi di anni fa. Per esempio, il citocromo c è identico nell'uomo e nello scimpanzé: nelle cellule di ambedue le specie, la molecola consiste di 104 amminoacidi aventi la stessa sequenza e la stessa struttura tridimensionale. D'altro canto, il citocromo c dell'uomo si distingue dal citocromo c della muffa del pane *Neurospora crassa* in 44 dei 104 siti, benché la struttura tridimensionale delle due molecole di citocromo c sia essenzialmente la stessa. Pensiamo di poter adesso spiegare perché un numero così grande dei 104 amminoacidi del citocromo c sia intercambiabile, mentre solo alcuni non possano essere sostituiti senza che la proteina cessi la sua attività.

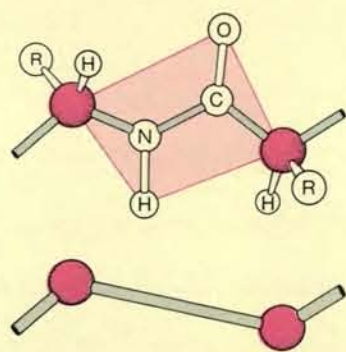
Cerchiamo di immaginare la Terra prima che apparisse il citocromo c. I primi organismi viventi sul pianeta erano poco più che « spazzini » che traevano composti organici ricchi di energia dall'acqua circostante, eliminando scorie a basso tenore energetico.

Dei « fossili viventi » di questo tipo sono ancora presenti nel processo universale della fermentazione anaerobica (senza ossigeno), che avviene nella cellula del lievito che estrae energia dallo zucchero producendo alcool etilico, oppure nell'atleta che durante un intenso sforzo muscolare converte glucosio in acido lattico ed è vittima di crampi muscolari.

La fermentazione anaerobica è una parte dell'eredità biologica che accomuna tutti gli organismi viventi.

Le possibilità di vita che il pianeta poteva offrire disponendo della fermentazione come unico mezzo per procurarsi energia, erano limitate dalla velocità con la quale i composti altamente energetici erano sintetizzati da agenti fisici quali radiazioni ultraviolette, scariche luminose, radioattività o calore. Quando alcuni organismi divennero capaci di utilizzare l'energia del sole nacque la fotosintesi e la capacità vitale della Terra crebbe enormemente. Questa fu l'età dei batteri e delle alghe azzurre (si veda l'articolo: *I fossili più antichi* di E. S. Barghoon, in « Le Scienze », n. 36, agosto 1971).

Le forme più progredite dotate di

Nella pagina a fianco è illustrata la struttura di una molecola di citocromo c, disegnata da Irving Geis. Una varietà di questa molecola proteica è presente nelle cellule di ogni organismo vivente che utilizza l'ossigeno per la respirazione. L'illustrazione mostra in modo schematico come si collegano le 104 molecole di amminoacido per formare una catena continua che circonda un gruppo eme, una rosetta complessa con un atomo di ferro al centro. I colori di questa figura indicano il grado di variabilità consentito dai processi evolutivi in ognuno dei 104 siti della molecola. In alcune specie manca l'ultimo amminoacido e tutte, eccetto i vertebrati, hanno altri otto amminoacidi all'inizio della catena (*si veda la tabella a pagina 48 e 49*). Gli amminoacidi, probabilmente più importanti, che sono per lo più invarianti durante l'evoluzione sono colorati in rosso e arancio; i siti che ammettono maggiori variazioni in verde-giallo, verde-azzurro, blu e porpora. Il gruppo eme che è insostituibile è cremisi. Ogni amminoacido è rappresentato dal suo atomo di carbonio alfa: l'atomo che porta una unica catena laterale caratteristica per ognuno dei 20 amminoacidi. Sotto a sinistra il disegno superiore mostra come si collegano due amminoacidi tramite un gruppo ammidico (*nel riquadro colorato*); le catene laterali connesse con gli atomi di carbonio alfa (*in colore*) sono rappresentate dai cerchi segnati R. La tabella sottostante riporta i simboli utilizzati per tracciare lo scheletro della molecola del citocromo c della figura accanto; non sono stati rappresentati i legami ammidici e vengono mostrati i soli gruppi laterali collegati all'eme. Gli amminoacidi nei 35 siti invarianti della molecola del citocromo c (*in rosso*) sono indicati con i simboli abbreviati (*si veda l'elenco in basso a destra*).

Ala Alanina	Leu Leucina
Asp Acido aspartico	Lys Lisina
Asn Asparagina	Met Metionina
Arg Arginina	Phe Fenilalanina
Cys Cisteina	Pro Prolina
Gly Glicina	Ser Serina
Glu Acido glutammico	Thr Treonina
Gln Glutammina	Trp Triptofano
His Istidina	Tyr Tirosina
Ile Isoleucina	Val Valina

NUMERO DI DIFFERENTI AMMINOACIDI TROVATI IN UNA DATA POSIZIONE IN 38 SPECIE	1	2	3	4	5	DA 6 A 9	
NUMERO DEL SITO AMMINOACIDICO NELLA MOLECOLA	35	23	17	12	9	8	EME

La composizione del citocromo c in 38 specie è illustrata nella tabella a sinistra. Nessun'altra proteina è stata analizzata cosí a fondo in tante specie diverse. La colorazione adottata differisce da quella dello schema a pagina 47. In queste due pagine il colore è usato per classificare gli amminoacidi a seconda delle loro caratteristiche chimiche (*si veda la tabella qui sopra*). Cosí i tre amminoacidi «oleosi» (idrofobi) con anelli aromatici nelle loro catene laterali (fenilalanina, triptofano e tirosina) sono colorati in rosso. Altri quattro amminoacidi idrofobi ma non aromatici sono colorati in arancio. All'altro estremo gli amminoacidi idrofobi sono colorati in azzurro e violetto. Gli amminoacidi ambivalenti rispetto all'acqua in verde e giallo. Gli amminoacidi polari possono avere una distribuzione asimmetrica di cariche negative e positive. La struttura di queste catene laterali è illustrata in dettaglio a pagina 51. È facile individuare nella tabella a sinistra i siti in cui l'evoluzione non ha consentito cambiamenti o ha permesso solo sostituzioni tra amminoacidi simili; questi siti sono indicati da strisce verticali di un solo colore. La lettera *a* all'inizio della catena sta a indicare che un gruppo metilico è legato alla parte terminale della catena molecolare. La lettera *h* indica che il gruppo è assente.

Nella pagina accanto è illustrata la molecola del citocromo c con le catene laterali. La figura mostra la struttura del citocromo c del cuore di cavallo nella forma ossidata, ricavata con l'analisi cristallografica a raggi X dall'autore e dai suoi colleghi, presso l'Istituto di Tecnologia della California. Gli atomi di carbonio alfa sono numerati; gruppi ammidici (–CO–NH–) collegano questi atomi e sono rappresentati da bastoncini come nei disegni precedenti. Sono state omesse per chiarezza tre catene laterali della parte posteriore della molecola: la leucina 35, la fenilalanina 36 e la leucina 98. La colorazione è la stessa di quella delle figure a pagina 48 e 49. Dalla struttura si può vedere che le catene laterali all'interno della molecola, intorno al gruppo eme (*in cremisi*), sono generalmente idrofobe (*in rosso e arancio*), mentre gli amminoacidi con catene laterali idrofile (*in azzurro e violetto*) si trovano per lo piú all'esterno dove sono a contatto con acqua. Un'importante eccezione a questa regola è la catena laterale idrofoba della fenilalanina 82 che si trova sulla superficie della molecola a sinistra dell'eme. La regione tra le catene idrofile e sotto l'isoleucina forma una cavità apparentemente aperta alle molecole di solvente: si sa che la lisina 13, al di sotto di questa cavità, reagisce col grosso complesso dell'ossidasi quando il citocromo c viene ossidato. Nella figura in alto è indicata la formula di struttura delle diverse catene laterali dei 20 amminoacidi.

fotosintesi liberarono nell'atmosfera un gas corrosivo e velenoso: l'ossigeno. Alcuni batteri reagirono rifugiandosi nelle zone del pianeta prive di ossigeno, dove i loro discendenti si trovano ancora oggi. Altri batteri e le alghe azzurre svilupparono dei sistemi per neutralizzare l'ossigeno gassoso legandolo con i loro prodotti di rifiuto. Il passo successivo fu quello di utilizzare l'energia ottenuta tramite l'ossidazione di questi prodotti intermedi di rifiuto (cosí come ci si può scaldare alla fiamma ottenuta bruciando i propri rifiuti). Nacque cosí l'ossidazione biologica o respirazione, la seconda tappa fondamentale nell'incremento delle fonti di energia disponibili per la vita sulla Terra.

Quando una cellula di lievito ossida gli zuccheri fino ad anidride carbonica e acqua, anziché arrestarsi all'alcool etilico, essa usufruisce di un quantitativo di energia 19 volte maggiore per grammo di carburante. Quando l'ossigeno reagisce con l'acido lattico nei muscoli dell'atleta e i crampi spariscono, egli riceve in corrispondenza piú energia dal suo glucosio.

Qualsiasi miglioramento nel metabolismo, che dia un incremento di energia cosí notevole, avrà presumibilmente un effetto rivoluzionario sullo sviluppo della vita. Noi adesso crediamo che eventi quali la specializzazione delle cellule e l'avvento di piante e animali pluricellulari, abbiano potuto aver luogo soltanto in presenza di una nuova, grande fonte di energia.

Batteri e alghe azzurre sono organismi procariotici; il loro materiale genetico, il DNA, non è raccolto dentro un nucleo organizzato e i loro dispositivi respiratori e fotosintetici (qualora ne siano provvisti) sono anch'essi dispersi. Le alghe verdi e tutte le piante e gli animali superiori sono eucariotici (possiedono cioè un vero e proprio nucleo). Il loro DNA è organizzato in un nucleo con membrana nucleare e la loro respirazione ha luogo in organelli chiamati mitocondri. Nelle piante eucariotiche la fotosintesi avviene in altri organelli chiamati cloroplasti. I mitocondri rappresentano le centrali energetiche di tutte le cellule eucariotiche. Il loro ruolo è di spezzare le molecole ricche di energia ottenute dai cibi, combinarle con l'ossigeno e immagazzinare l'energia tramite la sintesi di molecole di adenosintrifosfato (ATP). I mitocondri di tutti gli organismi eucariotici sono biochimicamente simili, come se una volta messo a punto un meccanismo chimico ottimale, non ci fosse piú stata la necessità di cambiarlo.

L'ossidazione biologica coinvolge almeno un gruppo di enzimi speciali che agiscono prima come accettori e poi come donatori di elettroni o di atomi di idrogeno rimossi dalle molecole degli alimenti. Nell'ultima parte del processo, è utilizzata una serie di molecole di citocromo (identificate in figura con lettere diverse) aventi tutte un gruppo «eme» contenente ferro, lo stesso eme che si trova nell'emoglobina. Gli elettroni scorrono lungo una catena di molecole di citocromo: dal citocromo b al citocromo c_1, dal citocromo c_1 al citocromo c, al citocromo a e a_3 e finalmente agli atomi di ossigeno dove si legano con ioni idrogeno per dare acqua. In questo processo l'energia non viene liberata tutta insieme ma gradualmente in quantità discrete. Nel trasferimento degli elettroni dal citocromo b al citocromo c_1 e poi in quello fra i citocromi a, a_3 e l'ossigeno, l'energia liberata viene utilizzata per la sintesi di ATP, che è la fonte principale di energia per il metabolismo cellulare.

I citocromi sono per la maggior parte legati saldamente alla membrana mitocondriale, ma uno di essi, il citocromo c, può essere facilmente estratto in soluzioni acquose e isolato in forma pura. Gli altri componenti possono essere isolati come complessi multienzimatici: b e c_1 come citocromo reduttasi ed a e a_3 come citocromo ossidasi. La reduttasi dona elettroni al citocromo c; la ossidasi li accetta da questo. Per illustrare quanto tutti gli eucarioti realmente si assomiglino tra loro, basta dire che il citocromo c proveniente da una qualsiasi specie vege-

tale o animale può reagire in provetta con la citocromoossidasi di una qualsiasi altra specie. Il verme e il primate, la balena e il frumento sono tutti simili al di là della membrana mitocondriale.

L'evoluzione del citocromo c

Poiché il citocromo c è cosí antico e nello stesso tempo cosí piccolo e facilmente purificabile, esso è stato oggetto di grande attenzione da parte degli studiosi delle proteine interessati ai processi evolutivi. La sequenza completa degli amminoacidi del citocromo c è stata determinata in piú di 40 specie eucariotiche. Trentotto di queste sequenze vengono paragonate nelle illustrazioni alle pagine 48 e 49. Possediamo piú informazioni sull'evoluzione di questa molecola che sull'evoluzione di qualsiasi altra proteina.

Emanuel Margoliash della Northwestern University ed Emil Smith dell'Università della California a Los Angeles sono stati tra i primi a notare che le sequenze degli amminoacidi dei citocromi di specie diverse presentano differenze tanto piú spiccate quanto maggiore è la distanza che separa le specie lungo la scala evolutiva.

L'analisi dettagliata di queste differenze, eseguita col calcolatore elettronico, da Margoliash, da Walter Fitch dell'Università del Wisconsin e da altri, ha consentito di tracciare complessi alberi genealogici di organismi viventi senza ricorrere affatto ai dati morfologici tradizionali. Questi alberi genealogici sono in accordo con quelli della sistematica classica; è ovvio quindi che il confronto delle sequenze degli amminoacidi è un ottimo strumento per studiare i processi evolutivi.

Un altro risultato può sulle prime sorprendere. Il citocromo c è ancora in lenta evoluzione e, facendo una media su periodi di tempo geologici, a una velocità approssimativamente costante per tutte le specie. Un'analisi di questo genere è stata effettuata per la prima volta sull'emoglobina, dieci anni fa, da Linus Pauling ed Emil Zuckerkandl dell'Istituto di Tecnologia della California. Se paragoniamo l'emoglobina col citocromo c, troviamo che quest'ultimo si evolve molto piú lentamente. Perché avviene questo? Le catene polipeptidiche vengono sintetizzate mediante istruzioni contenute nel DNA, ed è nel DNA che hanno luogo le mutazioni. Ci si chiede quindi se le mutazioni sono piú frequenti nel DNA che codifica la sintesi dell'emoglobina e meno frequenti nel DNA che codifica quella del citocromo c. Non c'è ragione di crederlo. La spiegazione va piuttosto cercata nel processo di selezione naturale, che decide se una molecola mutata può compiere o no la propria funzione.

Prima di esaminare le diverse formule che hanno superato questa prova, descriverò brevemente la struttura generale di una proteina. Tutte le molecole proteiche sono formate da amminoacidi uniti tra loro per le estremità. Ciascuno dei 20 amminoacidi possiede un gruppo carbossilico (–COOH) a una estremità e un gruppo amminico ($-NH_2$) all'altra. Quando il gruppo carbossilico di un amminoacido si lega con il gruppo amminico di un altro viene eliminata una molecola d'acqua e si forma un legame peptidico, che è un tipo di legame ammidico (–CO–NH–). Poiché soltanto una parte (anche se quella caratteristica) dell'amminoacido entra nella catena proteica questa viene detta « residuo ». Si parla cosí di un residuo di glicina o di un residuo di fenilalanina, in una certa posizione della catena proteica.

L'atomo di carbonio adiacente al legame peptidico si chiama carbonio alfa (C_α). Questo atomo è importante perché ogni amminoacido ha in questa posizione una caratteristica catena laterale. Questa può essere costituita semplicemente da un atomo di idrogeno (come nella glicina) o da raggruppamenti atomici come l'anello aromatico a 6 atomi di carbonio presente nella fenilalanina, nel triptofano e nella tirosina. I venti amminoacidi possono essere suddivisi in tre classi a seconda del carattere della loro catena laterale (*si veda la figura a pagina 51*). Cinque sono idrofili, hanno cioè affinità per l'acqua, e tendono a ionizzarsi sia positivamente che negativamente in soluzione acquosa; dei cinque, tre sono basici (arginina, istidina, e lisina) e due sono acidi (acido aspartico e acido glutammico). Sette non sono facilmente solubili in acqua e sono chiamati perciò idrofobi; sono compresi in questa classe i tre amminoacidi menzionati precedentemente che hanno anelli aromatici nelle catene laterali, piú la leucina, l'isoleucina, la metionina e la valina. I rimanenti otto hanno carattere intermedio e sono l'alanina, l'asparagina, la cisteina, la glutammina, la glicina, la prolina, la serina e la treonina.

Vediamo quali differenze esistono tra le formule del citocromo c di specie diverse. Le molecole di citocromo c dell'uomo e del cavallo differiscono in 12 dei 104 amminoacidi. I citocromi c dei vertebrati superiori – mammiferi, uccelli e rettili – differiscono dai citocromi c dei pesci in 19 amminoacidi. I citocromi c dei vertebrati e degli insetti differiscono, in media, in 27 amminoacidi; inoltre, le molecole di citocromo c degli insetti e delle piante hanno alcuni amminoacidi in piú all'inizio della catena. La massima differenza tra due citocromi c si riscontra tra quello dell'uomo e quello della muffa del pane (*Neurospora*); essi differiscono per piú del 40 per cento delle posizioni relative degli amminoacidi. Come possono due molecole con tali differenze avere una identica funzione chimica?

Si intravede la risposta osservando quali parti della molecola presentano queste differenze. Alcuni tratti della sequenza degli amminoacidi, come si può osservare nelle pagine 48 e 49, non cambiano mai. Trentacinque dei 104 amminoacidi del citocromo c sono assolutamente invarianti in tutte le specie conosciute, inclusa una lunga sequenza dal residuo 70 fino al residuo 80. I 35 siti invarianti, indicati in rosso nella figura a pagina 47, sono occupati da 15 diversi amminoacidi. Altri 23 siti, indicati in arancio nell'illustrazione, possono essere occupati solo da due amminoacidi molto simili tra loro; in essi esistono 18 diversi sistemi di coppie intercambiabili. In 17 siti la selezione naturale ha evidentemente accettato soltanto delle combinazioni di tre differenti amminoacidi; queste 17 triplette intercambiabili sono colorate in giallo verde.

Lo studio chimico delle sequenze aveva già messo in evidenza, prima delle analisi strutturali con raggi X, che dove le sostituzioni sono ammesse, gli amminoacidi intercambiabili hanno quasi sempre lo stesso carattere chimico. Generalmente tutti devono essere o idrofili o idrofobi o eventualmente neutri verso l'acqua. Queste sostituzioni sono dette conservative perché mantengono le caratteristiche essenziali di quella parte della molecola proteica. Soltanto in alcuni siti della catena possono essere tollerati dei cambiamenti radicali. Il residuo 89, per esempio, può essere acido (acido aspartico o acido glutammico), basico (lisina), polare ma non ionizzato (serina, treonina, asparagina e glutammina), leggermente idrofobo (alanina) o sprovvisto di catena laterale (glicina). L'unico tipo di catena laterale che non sembra poter occupare questa posizione è un grosso gruppo idrofobo. Tali regioni, che potremmo chiamare, « indifferenti », sono tuttavia rare, e il citocromo c è, nel suo complesso, una molecola conservativa dal punto di vista evolutivo.

Non c'è ragione di pensare che il gene del citocromo c muti con minore velocità di quello dell'emoglobina, né che le regioni invarianti, conservative e indifferenti della sequenza riflettano una differenza nella velocità di mutazione delle corrispondenti regioni del gene del citocromo c. Le mutazioni avvengono presumibilmente a caso e quelle che osserviamo, quando confrontiamo le varie specie, sono molecole sopravvissute alla severa prova della selezione naturale. Sono evidentemente invarianti quelle regioni in cui qualsiasi mutazione, essendo letale, viene eliminata. I cambiamenti conservativi possono essere tollerati in una altra regione della molecola nella misura in cui essi ne conservano le proprietà chimiche essenziali. I cambiamenti radicali presumibilmente riguardano le zone della molecola che non hanno importanza per l'attività specifica della proteina.

Queste sono le conclusioni cui si può giungere col solo confronto delle sequenze. Questa interpretazione che spiega la variabilità in termini di essenzialità o non essenzialità delle differenti parti della molecola è certamente plausibile, ma la scienza ha sempre offerto ipotesi plausibili ma non certe. Per andare oltre, dobbiamo sapere come la sequenza degli amminoacidi si dispone nello spazio per formare una molecola funzionale. In altre parole, occorre indagare sulla struttura tridimensionale della proteina.

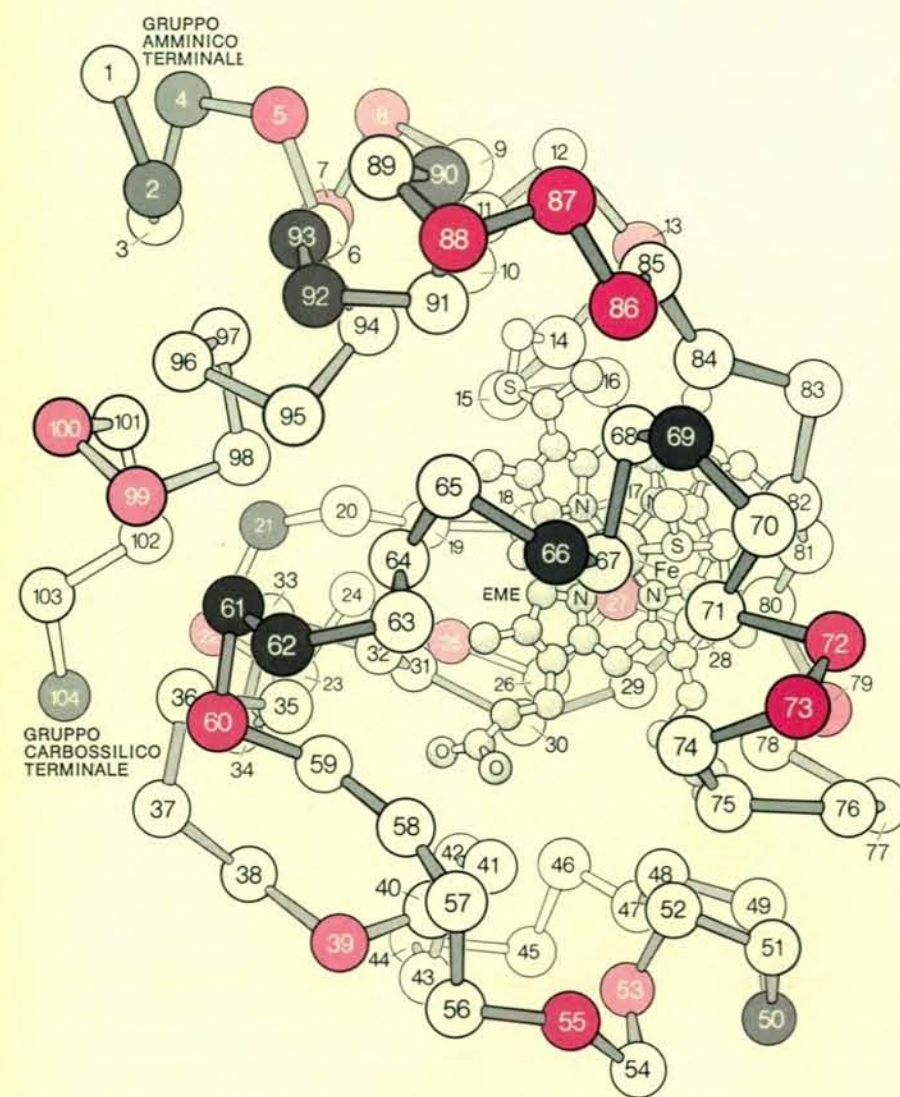
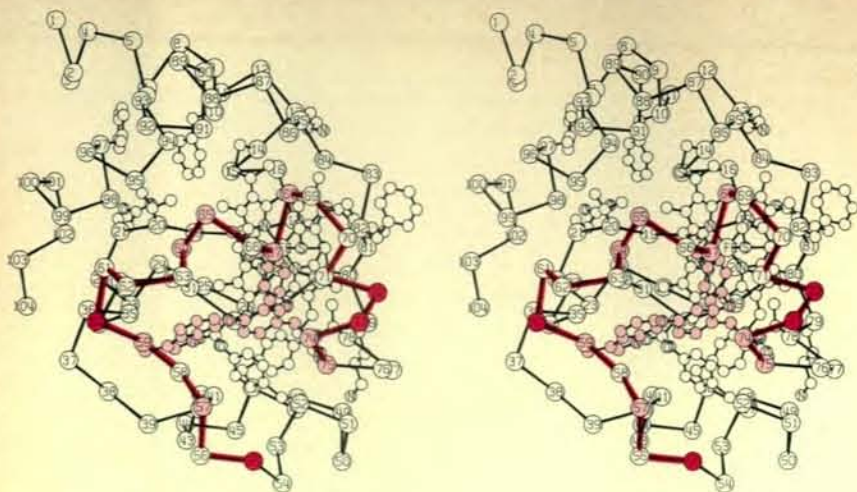
La molecola a tre dimensioni

Nel 1963 presso l'Istituto di Tecnologia della California, con l'appoggio della National Science Foundation e del National Institute of Health cominciai l'analisi cristallografica mediante raggi X del citocromo c proveniente dal cuore di cavallo, con l'attiva collaborazione di Margoliash, che allora lavorava nei laboratori Abbott, a North Chicago. Poiché il citocromo c opera il trasferimento degli elettroni all'interno del mitocondrio, esso oscilla tra una forma ossidata (ferricitocromo) e una ridotta (ferrocitocromo); l'atomo di ferro del gruppo eme ha, alternativamente, numeri di ossidazione + 3 e + 2. Per motivi di convenienza decidemmo di iniziare la nostra analisi dalla forma ossidata, perché per comprendere il processo di trasferimento degli elettroni era in ogni caso necessaria la conoscenza di entrambi gli stati di ossidazione.

Nella cristallografia a raggi X, si dirige un fascio di raggi X su un cristallo della sostanza studiata e si registra lo spettro di diffrazione prodotto dalla incidenza del raggio con il campione sotto angoli diversi. I raggi X che entrano nel campione sono deviati con angoli differenti, a seconda della distribuzione delle cariche elettriche dentro il cristallo.

Per ricavare dalle decine di migliaia di dati forniti dalla diffrazione dei raggi X, la distribuzione tridimensionale delle cariche, sono stati messi a punto dei programmi per calcolatore elettronico molto elaborati. Da questa distribuzione si può a sua volta dedurre quella delle catene laterali degli amminoacidi della molecola proteica.

Abbiamo ottenuto la nostra prima mappa a bassa risoluzione della forma ossidata del citocromo c del cuore di cavallo cinque anni fa e la prima ad alta risoluzione tre anni fa.

Queste mappe sono state usate per costruire dei modelli tridimensionali molto dettagliati della proteina. Inoltre le coordinate tridimensionali possono essere introdotte in un calcolatore per ottenere dei semplici modelli a palla e bastoncino i quali, guardati stereoscopicamente, permettono la visualizzazione tridimensionale della catena della proteina (*si vedano le illustrazioni nelle pagine seguenti*). Appena un anno fa, noi abbiamo calcolato la pri-

La distribuzione delle cariche nella parte posteriore del citocromo c del cuore di cavallo mostra che la maggioranza delle 19 lisine idrofile (*in colore*) che portano cariche positive (e sono quindi basiche) sono localizzate ai fianchi della molecola. Nove delle 12 catene laterali (*in grigio*) cariche negativamente (*acide*) sono raggruppate in un'unica zona superiore centrale della molecola. Il carattere elettrico negativo è stato mantenuto in questa zona durante tutta l'evoluzione, nonostante che siano variabili le posizioni delle singole catene laterali acide. Nessun organismo, dal germe del grano all'uomo, ha un citocromo c con meno di sei amminoacidi in questa zona, e piú di cinque in altre zone della molecola. Inoltre questi valori estremi non si trovano mai contemporaneamente nella stessa specie. È molto probabile che queste zone cariche positivamente o negativamente contribuiscano a legare il citocromo c ad altre grosse molecole.

La coppia stereoscopica della parte sinistra della molecola ossidata di citocromo c, ottenuta al calcolatore, mostra per semplicità solo poche catene laterali. La sequenza principale (*in colore*) dai siti 55 al 75 forma un'ansa, il canale sinistro, che è occupato da catene laterali fortemente idrofobe, i cui atomi di carbonio alfa sono indicati con colori tenui. Tre di queste catene laterali presentano degli anelli aromatici: il triptofano 59, la tirosina 67 e la tirosina 74, e sono anch'essi indicati con colori tenui. Gli atomi di carbonio alfa con catene laterali idrofile e cariche positivamente, disposti intorno al canale sinistro, sono indicati con colori scuri. Questa coppia stereoscopica e quella della pagina accanto possono essere osservate con normali occhiali stereoscopici.

ma mappa ad alta risoluzione della forma ridotta del citocromo c. Adesso stiamo perfezionando questo modello e confrontando la struttura della molecola nei due stati di ossidazione. Avevamo già presenti alcune caratteristiche notevoli delle sequenze degli amminoacidi del citocromo c, quando lavoravamo sulla prima struttura ad alta risoluzione. Sapevamo infatti che i siti piú conservativi durante l'evoluzione, erano quelli occupati dai residui di fenilalanina, triptofano e tirosina e dai quattro residui idrofobi, ma non aromatici, di leucina, isoleucina, metionina e valina. Nella figura a pagina 50, la cui colorazione differisce da quella della figura a pagina 47, questi residui idrofobi sono indicati in rosso e arancio mentre quelli neutri e idrofili, sia basici che acidi, sono indicati in verde, giallo, blu e viola.

Già dall'analisi chimica della sequenza degli amminoacidi si sapeva che i gruppi basici e idrofobi sono generalmente riuniti, lungo la catena, in piccoli gruppi. Per esempio, residui basici si trovano nei seguenti siti: dal 22 al 27, nel 38 e 39, dal 53 al 55, e dall'89 al 91. Siti occupati dai residui idrofobi sono quelli dal 9 all'11, dal 32 al 37, dall'80 all'85 e dal 94 al 98. I residui nei siti 14 e 17 (cisteina) e 18 (istidina) sono invarianti, il che è comprensibile perché essi formano legame col gruppo eme. È meno facile spiegare perché l'ampio tratto dal sito 70 fino all'80 sia ugualmente invariante. Ancor prima che fossero state ottenute prove strutturali, si sospettava che la metionina, al sito 80, potesse legare l'atomo di ferro sul lato opposto dell'eme cui si legava l'istidina (sito 18), ma le sole prove chimiche non bastavano a confermarlo.

Dall'analisi chimica si sapeva che il citocromo c del cavallo conteneva 12 glicine (residui con idrogeno come catena laterale) e che queste erano invarianti o per lo meno erano conservate in quasi tutte le specie. Si sapeva inoltre che delle otto fenilalanine o tirosine (con anelli aromatici nelle catene laterali) sette erano invarianti in tutte le specie o potevano scambiarsi soltanto fra loro. In tre specie la fenilalanina o la tirosina sono sostituite nel residuo 36 dalla isoleucina, la cui catena laterale, pur non essendo aromatica, è altrettanto grande e idrofoba di quella che sostituisce.

L'esistenza di queste strutture conservative e di queste somiglianze era già nota prima dell'analisi con raggi X, ma non poteva essere spiegata in termini strutturali. Si pensava in effetti che ciascun residuo fosse dove si trovava per selezione naturale e che esso contenesse potenzialmente importanti informazioni sulle parti funzionali della molecola del citocromo c. La selezione naturale, tuttavia, non agisce sulla sequenza degli amminoacidi, ma sulla intera molecola nella sua configurazione spaziale, e in associazione con le altre. Avere soltanto una sequenza chimica, senza nessuna informazione sulla configurazione spaziale, è come avere l'elenco delle parti di una macchina senza il progetto.

Il citocromo c e l'evoluzione

Adesso che la struttura del citocromo c è conosciuta esaminiamo con maggiore attenzione la sua rappresentazione a pagina 47. Per rendere l'illustrazione piú semplice, non sono state disegnate le catene laterali, a eccezione di quelle che sono legate al gruppo eme. Inoltre, lungo la catena principale l'illustrazione porta soltanto gli atomi di carbonio alfa da cui si ramificherebbero le catene laterali, se fossero indicate. I gruppi ammidici (–CO–NH–), che connettono carboni alfa, sono rappresentati semplicemente da linee rette. Il disegno è perciò un semplice schema della configurazione della molecola del citocromo.

Il gruppo dell'eme, una « rosetta » simmetrica di atomi di carbonio e d'azoto, con un atomo di ferro nel centro, è situato in una fessura e ha un solo bordo a contatto con l'esterno. Se l'eme partecipa direttamente al trasferimento degli elettroni, dentro e fuori la molecola, questo probabilmente ha luogo proprio lungo questo lato. Come è indicato nel disegno, l'eme è mantenuto in posto a destra dalle cisteine 14 e 17 e dall'istidina 18 e a sinistra dalla metionina 80.

Era noto dagli studi precedenti sulla struttura delle proteine, effettuati con i raggi X, che le sequenze degli amminoacidi prendono frequentemente una disposizione a elica, nota come elica alfa; in altri casi invece tendono ad assumere una configurazione increspata o a pieghe, che si chiama appunto piega beta. Il citocromo c non contiene pieghe beta e soltanto due zone, formate dai residui 1-11 e 89 e 101 ad alfa elica. La catena proteica infatti è quasi tutta avvolta strettamente attorno all'eme, lasciando poco spazio per le configurazioni che prevalgono in altre proteine.

Come ci si può servire del citocromo per ottenere informazioni sull'evoluzione, cosí questa può essere utilizzata per approfondire le nostre conoscenze sul citocromo c. Come ho già accennato, l'illustrazione a pagina 47 è colorata in modo da indicare il grado di variabilità ammesso in ogni sito. I colori rosso e arancio indicano i siti funzionalmente importanti della molecola, dove le differenze fra le specie sono rare o mancano del tutto; i colori verde, blu e viola indicano invece i siti che, ammettendo notevoli variazioni tra specie e specie, sono presumibilmente meno importanti per una molecola funzionale di citocromo c.

La regione che circonda l'eme è rossa o arancione; vi è quindi una spiccata tendenza a mantenere invariato nel corso dell'evoluzione l'ambiente del gruppo eme.

La coppia stereoscopica della parte destra della molecola ossidata di un citocromo c, mostra due sequenze disposte ad alfa elica: quella dal sito 1 all'11 e quella dal sito 89 al 101. Le due eliche alfa e la sequenza dal sito 12 al 20 delimitano il canale destro. Come quello sinistro esso è bordato da residui con catene laterali idrofobe, ma apparentemente contiene una fessura abbastanza grande da ospitare una catena idrofoba laterale di un'altra molecola. Come la rappresentazione stereoscopica della pagina precedente, gli atomi di carbonio alfa con catene laterali cariche positivamente disposte intorno a questo canale sono indicati con colori scuri, quelli con catene laterali fortemente idrofobe sono indicati con colori chiari. Il programma usato per tracciare queste rappresentazioni stereoscopiche è stato messo a punto presso l'Oak Ridge National Laboratory.

Anche i residui da 70 a 80 sono invarianti, e ora sappiamo che sono disposti in modo da formare il lato sinistro della molecola e la fessura occupata dall'eme. Il lato destro della molecola è pure esso invariante; infatti è formato da uno, due o al massimo tre differenti amminoacidi. La parte indifferente della molecola è quella posteriore; i siti 58 e 60 e gli altri quattro residui posti dietro l'alfa elica sono occupati da sei o piú amminoacidi che cambiano da specie a specie. Questi siti costituiscono le connessioni tra parti piú importanti della molecola, sia per il trasferimento degli elettroni, sia per l'interazione tra i due grandi complessi molecolari, la reduttasi e l'ossidasi.

In che modo la molecola è ripiegata

Tornando all'illustrazione a pagina 50, che mostra tutte le catene laterali del citocromo c del cuore di cavallo, si comincia a comprendere la tendenza evolutiva alla conservazione, relativa a molti siti. Nella figura i gruppi ammidici sono rappresentati da linee rette; le loro posizioni atomiche sono conosciute, ma non sono particolarmente importanti per questo articolo. In essa i colori sono scelti in modo da classificare i vari siti secondo il carattere idrofilo, idrofobo o ambivalente dell'amminoacido che li occupa. La stessa colorazione presentano le illustrazioni delle pagine 48 e 49 che mostrano le sequenze degli amminoacidi nei citocromi c di 38 specie diverse.

I gruppi non polari e idrofobi si trovano in prevalenza all'interno della molecola, lontani dall'acqua che occupa l'ambiente esterno, mentre i gruppi con carica acida o basica sono sempre all'esterno. Questa disposizione offre un buon esempio della tipica configurazione « a goccia d'olio » della proteina. Secondo questo modello, quando in una cellula viene sintetizzata una catena polipeptidica, essa viene spinta ad avvolgersi dalla tendenza naturale delle catene laterali idrofobe o « oleose » ad allontanarsi il piú possibile dall'acqua dell'ambiente esterno per raggrupparsi nel centro della molecola. Si può anzi affermare che, se per il buon funzionamento di una proteina occorre che certe regioni della catena polipeptidica siano piegate all'interno, in esse verranno trattenute per selezione naturale delle catene laterali idrofobe che spingono la molecola ad acquistare la forma che le è propria. Una catena laterale ionizzata o idrofila, può essere sospinta all'interno della molecola proteica, ma ciò richiede un gran dispendio di energia. Cosí, nella maggioranza dei casi, la presenza di gruppi carichi in un certo sito significa che in quel punto la catena è disposta all'esterno della molecola (solo in uno o due casi si sa di gruppi carichi posti all'interno della proteina, in cui giocano un ruolo nel meccanismo della catalisi enzimatica).

Possiamo adesso comprendere la ragione della tendenza evolutiva alla conservazione delle catene laterali idrofobe e del residuo idrofilo della lisina: da essi dipende la giusta configurazione della molecola. Tutte le sostituzioni radicali di catene laterali che impediscono alla molecola di prendere la forma appropriata sono letali. Senza ripiegamento non vi è citocromo; senza citocromo non vi è respirazione; e senza respirazione non vi è vita. Succede raramente che il rapporto causa-effetto nella evoluzione, sia cosí lampante.

C'è da aggiungere qualche cosa a proposito della lisina. Le lisine non si trovano esclusivamente all'esterno della molecola; esse sono raggruppate in due regioni della superficie molecolare cariche positivamente separate da una regione con carica negativa. Questa segregazione di cariche, assente nelle altre proteine, trova probabilmente una spiegazione, come vedremo, nel fatto che il citocromo c interagisce con due complessi molecolari, la reduttasi e l'ossidasi, anziché con piccole molecole di substrato, come accade per gli enzimi. Si pensa che le disposizioni di cariche siano parte di quel processo che permette alle grosse molecole di riconoscersi.

Osservando la molecola da dietro, come nella figura a pagina 52, le 19 lisine si trovano sui lati destro e sinistro. Questi sono rappresentati a loro volta nelle figure stereoscopiche a pagina 54 e 55. Sul lato sinistro, dal sito 55 fino al 75, 8 lisine circondano una ansa della catena, strettamente impacchettata da gruppi idrofobi, tra cui piú internamente gli invarianti tirosina 74, triptofano 59 e tirosina 67. Anche se non conosciamo ancora il meccanismo del trasferimento degli elettroni, è stato suggerito che gli anelli aromatici dei tre residui invarianti, quando il citocromo c è allo stato ridotto, costituiscono un percorso interno per il moto degli elettroni. Altre 8 lisine si trovano sul lato destro della molecola, alla periferia di quello che sembra proprio essere un vero e proprio canale, abbastanza grande da ospitare una catena idrofoba di un'altra grande molecola. Questo canale situato sul lato destro è delimitato da due alfa eliche e dal seguito della prima alfa elica attraverso i residui dal 12 al 20. Dentro si trovano due grandi catene laterali aromatiche: la fenilalanina 10 (invariante) e la tirosina 97 (che può essere sostituita solo da fenilalanina). Riassumendo, sul lato destro c'è un canale delimitato da gruppi idrofobi (tra cui due anelli aro-

La velocità di evoluzione delle proteine (*si veda l'illustrazione della pagina a fianco*) **può essere ricavata mettendo in grafico le differenze medie nelle sequenze degli amminoacidi esistenti tra le molecole di citocromo c di due specie appartenenti a due rami divergenti di una dicotomia datata; per esempio la dicotomia pesci-rettili o rettili-mammiferi. Le differenze medie** (*disposte in ordinata*) **sono state corrette per tener conto della possibilità di piú di una mutazione in ogni sito. La lunghezza delle sbarrette verticali indica lo scarto sperimentale. L'epoca in cui è avvenuta la divergenza tra due linee evolutive di organismi è stata ricavata da dati geologici e i tempi relativi sono stati disposti in ascissa. Le figure sotto il grafico mostrano schematicamente la funzione delle molecole di cui è stata calcolata la velocità di evoluzione. Questa è proporzionale alla pendenza della curva e può essere rappresentata da un numero chiamato periodo evolutivo unitario, dato dal tempo occorrente a una sequenza di amminoacidi di una proteina per avere una variazione dell'1 per cento dopo una dicotomia. Per i fibrinopeptidi questo periodo è di circa 1,1 milioni di anni, mentre per l'istone IV è di 600 milioni di anni. La causa probabile di questa differenza è esposta in quest'articolo.**

matici) e circondato da una sfera esterna di cariche positive. Come qualcuno nel nostro laboratorio ha notato guardando questo modello, esso assomiglia a una piattaforma per razzi spaziali.

Questo rilievo non è frivolo come può sembrare. È noto che la attrazione tra citocromo c e citocromossidasi è prevalentemente di natura elettrostatica, e interessa gruppi carichi negativamente dell'ossidasi e gruppi basici positivi del citocromo c. In questo legame devono essere coinvolti sia il gruppo sinistro, che quello destro, delle lisine. Per di piú, Kazuo Okunuki, dell'Università di Osaka, ha dimostrato che basta che una sola carica positiva, quella della lisina 13, venga bloccata da un grosso gruppo chimico aromatico perché la reattività del citocromo c con l'ossidasi venga dimezzata. Bloccare chimicamente la lisina 13 vuol dire bloccare fisicamente la parte superiore della fessura dell'eme. La lisina 13 è piú vicina al gruppo destro di cariche positive che non al sinistro; sembra quindi probabile che la fessura dell'eme sia, insieme al canale destro, la parte di superficie molecolare che si lega al complesso enzimatico dell'ossidasi.

Quali sono allora i ruoli della zona positiva sul lato sinistro del tratto posteriore? La zona positiva con i suoi tre anelli aromatici può essere il sito di legame con la reduttasi, ma non sappiamo virtualmente nulla sulla natura chimica di questo legame. Il tratto negativo può essere uno « scarico di rifiuti », una parte poco importante della superficie della molecola, dove però ci sono cariche negative sufficienti a impedire un eccesso di cariche positive. Il fatto che i sei siti piú variabili si trovino in questa parte della molecola, rafforza questa supposizione.

D'altro canto, è anche possibile che questo insieme di cariche negative abbia una sua funzione. Gli amminoacidi sono effettivamente conservati nelle varie specie, anche se in una maniera cosí poco evidente da essere trascurati nei primi studi comparativi delle sequenze. La pressione selettiva ha mantenuto negativa questa zona della molecola, anche se i residui individuali che portano queste cariche differiscono da una specie all'altra. Poiché varie parti della catena proteica interessano questa regione, la conservazione delle cariche negative non è evidente se ci si ferma a esaminare la sola sequenza distesa della molecola. Questo fatto illustra bene il principio dell'evoluzione molecolare, che cioè la selezione naturale agisce sulla proteina ripiegata e funzionale piuttosto che sulla mera sequenza di amminoacidi

Se osserviamo la posizione dei residui di glicina, possiamo capire perché un numero cosí grande di amminoacidi sia evolutivamente invariante. Il gruppo eme è cosí grande che 104 amminoacidi appena bastano per coprirlo. Ci sono molte zone dove la catena arriva troppo vicino all'eme o a un'altra parte della catena per permettere l'inserimento di una catena laterale. È proprio in questi punti che noi troviamo le glicine, che hanno degli atomi singoli di idrogeno come catene laterali.

L'ultimo tipo di conservativismo, quello delle catene laterali aromatiche, è piú difficile da spiegare. Le tirosine e le fenilalanine sono generalmente presenti in coppie vicine nella molecola ripiegata di citocromo c: i residui 10 e 97 nel canale destro, 46 e 48 sotto la fessura dell'eme, 67 e 74, lungo il triptofano 59 nel canale idrofobo sinistro. Soltanto il residuo 36, che può essere tirosina, fenilalanina o isoleucina, sembra avere un ruolo di puro riempimento della parte posteriore della molecola; esso è per cosí dire, « un mattone idrofobo ».

I tre anelli aromatici del canale sinistro possono essere coinvolti nel trasferimento degli elettroni durante la riduzione. I due anelli aromatici del canale destro potrebbero soltanto collaborare a definire la fessura idrofoba nel centro di questo canale. La tirosina 48 nel fondo della molecola serve a tenere l'eme in sede, mediante formazione di un legame di idrogeno con una catena laterale priopionica dell'eme. Nel citocromo c del tonno e della sardina, dove il residuo 46 è tirosina, le mappe di densità elettroniche hanno mostrato che anche questo residuo serve a reggere l'eme tramite un ponte d'idrogeno con un'altra sua catena propionica. Queste due tirosine, insieme con le cisteine 14 e 17, aiutano a tenere l'eme a suo posto, in un modo che non è stato riscontrato né nell'emoglobina né nella mioglobina.

La fenilalanina 82 è un enigma. Come la tirosina, la fenilalanina non rivolge mai la sua catena laterale idrofoba verso l'ambiente acquoso, sul lato sinistro della fessura dell'eme, dove non ha apparentemente alcun ruolo. Per la sua presenza qui deve essere pagato un prezzo elevato in termini di energia. Ci si chiede perché un grosso gruppo idrofobo sporga all'esterno della molecola, e perché esso sia assolutamente invariante nel corso dell'evoluzione. Considerando solo la forma ossidata della molecola, è impossibile dare risposta a questi quesiti, ma quando alla fine di questo articolo si prenderà in esame la struttura del citocromo c ridotto, nota solo da poco, si vedrà che in effetti una risposta esiste.

Le ragioni strutturali per cui il citocromo c ha sempre mantenuto la sua forma conservativa da quando esistono forme di vita eucariotiche, possono essere adesso chiaramente spiegate. Il citocromo c è l'unica fra tutte le proteine, la cui struttura sia stata analizzata, ad avere regioni separate di cariche sulla sua superficie. Nella trattazione svolta, sono stati assegnati alle varie regioni dei ruoli in base a congetture che possono anche essere errate; è certo però che esse devono avere un ruolo nella fisiologia della molecola. Né il caso, né la comune origine avrebbero potuto conservare in tutte le specie queste regioni positive e negative, con gruppi aromatici appaiati ed esposti, per piú di un miliardo d'anni d'evoluzione molecolare. Le sequenze conservative ci suggeriscono di indagare. Adesso dovremmo essere abbastanza preparati per sapere cosa cercare.

Velocità d'evoluzione delle proteine

Con l'informazione già ottenuta, possiamo tornare alla domanda che c'eravamo posti prima: che cosa determina la velocità evolutiva delle diverse proteine? Cominciamo col fare un

grafico in cui l'asse delle ordinate rappresenta la differenza media in amminoacidi nella sequenza di una proteina in due specie d'organismi che si trovano su due rami di una dicotomia evolutiva, quella, per esempio, fra pesci e rettili o fra rettili e mammiferi. L'asse delle ascisse rappresenta il tempo trascorso dal momento della divergenza delle due linee, determinato coi dati della geo-paleontologia. Se un grafico di questo genere è fatto per il citocromo c, si può osservare che tutti i punti di dicotomia stanno su una retta; ciò indica una velocità media costante dei cambiamenti evolutivi costanti (*si veda l'illustrazione a pagina 56*).

Come è possibile questo? Come ha potuto il citocromo c evolvere a una velocità quasi costante per un cosí lungo periodo di tempo, durante il quale la morfologia esterna degli organismi si veniva differenziando fino a giungere alla pianta del cotone, alla muffa del pane, alla mosca della frutta, al serpente a sonagli e allo scimpanzé attuali? Questo illustra il fondamentale vantaggio dell'uso delle proteine come modelli per studiare l'evoluzione. La selezione naturale opera, in ultima analisi, su intere popolazioni di organismi viventi, l'unico criterio di successo essendo la capacità della popolazione di sopravvivere, riprodursi e formare una nuova generazione. Piú ci si avvicina al livello molecolare nello studio degli organismi viventi, piú simili questi appaiono e meno importanti diventano le differenze morfologiche fra, per esempio, una vongola e un cavallo. Lo stesso tipo di meccanismo chimico può servire ai piú svariati organismi. D'altro canto, il cambiamento morfologico di un organismo, su cui può agire la selezione naturale, è solitamente l'effetto dell'attività non di una singola molecola enzimatica, ma di un intero sistema di vie metaboliche. La costanza osservata nella velocità evolutiva del citocromo c sta semplicemente a significare che la biochimica dell'organello respiratorio, il mitocondrio, è talmente funzionale, e il mitocondrio stesso cosí ben isolato dal processo di selezione naturale, che le pressioni selettive a livello molecolare vengono smorzate per periodi di milioni di anni.

La struttura proteica è piú distante dalle pressioni selettive e piú vicina alle origini delle mutazioni genetiche nel DNA di quanto non lo siano i caratteri anatomici macroscopici e gli schemi di comportamento ereditari.

Le sole altre proteine di cui conosciamo la sequenza degli amminoacidi in maniera sufficientemente approfondita da permetterci di condurre una analisi del tipo svolto precedentemente, sono l'emoglobina e i fibrinopeptidi, quelle corte catene peptidiche che vengono distese nel processo della coagulazione del sangue quando il fibrinogeno è convertito in fibrina. Una catena di emoglobina è formata da circa 140 amminoacidi. I fibrinopeptidi A e B, d'altro canto non contengono piú di 20 amminoacidi, staccati dal fibrinogeno durante il processo della coagulazione. Anche le emoglobine e i fibrinopeptidi sembrano evolvere ognuno a velocità media costante ma le loro rispettive velocità sono molto diverse. Mentre sono necessari 20 milioni di anni per produrre una variazione dell'1 per cento nella sequenza degli amminoacidi in due linee divergenti di citocromo c, una uguale variazione richiede poco meno di 6 milioni di anni nelle emoglobine e poco piú di un milione di anni nei fibrinopeptidi, come indicato a pagina 56. Il tempo richiesto approssimativamente per avere nelle sequenze degli amminoacidi della stessa proteina di due linee divergenti una variazione dell'1 per cento si definisce come « periodo evolutivo unitario ». Questo periodo è stato grossolanamente stimato per un certo numero di proteine di cui sono conosciute soltanto due o tre sequenze diverse in specie differenti. La maggioranza degli enzimi evolve approssimativamente con la stessa rapidità dell'emoglobina, cioè piú rapidamente del citocromo c.

Poiché non ci sono prove di una diversa velocità di mutazione, ci si può chiedere qual è la ragione della diversa pressione selettiva che si esercita su proteine differenti. La risposta sembra molto persuasiva (*si veda la figura a pagina 56*). I fibrinopeptidi sono dei distanziatori che impediscono al fibrinogeno di assumere la configurazione della fibrina prima che scatti il meccanismo della coagulazione. Essi non sembrano avere altre funzioni oltre quella di venir separati a opera di un enzima quando il sangue deve coagulare. Ci si può quindi aspettare che la molecola di fibrinogeno possa tollerare molti dei cambiamenti casuali che hanno luogo nei fibrinopeptidi. Se le unità di tempo evolutivo misurano la velocità con cui compaiono non le mutazioni in generale ma solo quelle non nocive, allora non sorprende il fatto che l'1 per cento di variazione nelle sequenze amminoacidiche dei fibrinopeptidi avvenga in poco piú di un milione di anni.

La probabilità di costruire una molecola riuscita di emoglobina è molto piú bassa. Ogni molecola di emoglobina contiene quattro gruppi eme, i quali non soltanto legano ossigeno, ma agiscono anche in modo tale che si liberi una maggior quantità nella cellula quando aumenta l'acidità locale dovuta all'accumulo di anidride carbonica. La base strutturale di questo meccanismo di respirazione è stata recentemente spiegata con l'aiuto della cristallografia a raggi X, da M. F. Perutz e dai suoi collaboratori del Laboratorio di Biologia molecolare del Medical Research Council in Inghilterra. Se una mutazione casuale ha una probabilità di procurare un danno cinque volte maggiore nell'emoglobina che nei fibrinopeptidi, si spiega perché l'unità del periodo evolutivo è anch'essa cinque volte piú lunga.

La possibilità di danneggiare a caso il citocromo c è evidentemente tre o quattro volte piú grande che per l'emoglobina. Perché questo? Perché l'unità evolutiva del citocromo c è piú grande di quella di enzimi di dimensioni paragonabili. La struttura di questa proteina rivelata con i raggi X, ci ha suggerito la risposta. Il citocromo c è una piccola proteina che interagisce su una grande porzione della sua superficie con grossi complessi molecolari. È, virtualmente, un substrato per i complessi enzimatici della reduttasi e dell'ossidasi. Gran parte della sua superficie è soggetta a una forte pressione conservativa, perché essa deve adattarsi perfettamente ad altre grandi molecole, dotate di una propria struttura genetica. Questo spiega perché la distribuzione delle cariche positive e negative si è conservata cosí fedelmente nella storia degli organismi eucariotici. Al contrario, l'emoglobina e la maggioranza degli enzimi interagiscono principalmente con molecole piú piccole; con l'ossigeno, nel caso dell'emoglobina, o con piccole molecole di substrato nei siti attivi degli enzimi. Purché queste limitate regioni della molecola siano preservate, il resto della superficie molecolare è relativamente libero di cambiare. Le mutazioni sono selezionate meno rigorosamente e di conseguenza le sequenze divergono piú rapidamente.

Una conferma soddisfacente viene dallo studio delle sequenze amminoacidiche dell'istone IV, una delle proteine basiche che si lega al DNA nei cromosomi e che può giocare un ruolo nell'espressione o nella soppressione dell'informazione genetica. Se si paragona la molecola dell'istone IV dei germogli di pisello con quella del timo di vitello, si trova che esse differiscono soltanto in due dei loro 102 amminoacidi. Se in base agli studi sul citocromo c datiamo il momento della separazione tra piante e animali a circa 1,2 miliardi di anni fa troviamo che l'istone IV ha come periodo evolutivo unitario 600 milioni di anni. È chiaro che la selezione naturale è stata molto conservativa per l'istone IV; del resto la sua sensibilità ai cambiamenti casuali non ci sorprende perché l'istone IV partecipa ai processi di controllo che sono alla base dei meccanismi genetici.

La data di 1,2 miliardi di anni fa per la divergenza delle piante dagli animali, è stata ottenuta dal confronto delle sequenze dei citocromi c facendo l'ipotesi che la costanza della velocità di evoluzione di questa molecola, osservata nei tempi piú recenti, possa essere estrapolata a epoche remote. È lecito fare questa estrapolazione? Per il citocromo c probabilmente sí, perché la biochimica del mitocondrio s'è evoluta prima ancora di quel momento; la grande somiglianza delle reazioni respiratorie in tutti gli organismi eucariotici fa ritenere che da allora non vi siano state modifiche sostanziali nel sistema citocromico. La catena respiratoria si era probabilmente già stabilizzata circa 1,2 miliardi di anni fa. Questo è in accordo con la sia pur scarsa documentazione fossile della vita precambriana.

Se si accetta la suggestiva ipotesi che gli organismi eucariotici si siano sviluppati dalla simbiosi di procarioti, uno dei quali un batterio capace di respirare, predecessore dell'attuale mitocondrio, si è obbligati a concludere che il meccanismo respiratorio si è stabilizzato in una forma molto simile all'attuale durante o prima di questa simbiosi. Non può dirsi lo stesso per l'emoglobina e il suo probabile antenato, la mioglobina. Queste molecole non forniscono alcuna informazione sull'epoca della divergenza fra le piante e gli animali perché durante e dopo il periodo in cui apparvero gli organismi multicellulari esse si stavano evolvendo per svolgere differenti funzioni. Non si può dire quindi che le globine si siano stabilizzate 1,2 miliardi di anni fa. Tuttavia se si scelgono delle proteine adatte e se non si estrapolano troppo i dati, dovrebbe essere possibile utilizzare la velocità dell'evoluzione proteica per datare eventi nell'evoluzione della vita di cui ci sono solo scarse tracce geologiche.

Finora, abbiamo accennato solo di sfuggita al meccanismo di trasferimento degli elettroni, ignorando virtualmente la struttura del citocromo c ridotto. Questo fa storia a sé, una storia che non può essere ancora scritta. Si spera che i dati forniti dall'analisi a raggi X suggeriscano gli esperimenti chimici piú adatti per conoscere il meccanismo del processo ossido-riduttivo. La struttura del citocromo c ridotto è stata ottenuta cosí recentemente che sarebbe prematuro basare troppe deduzioni su di essa.

Cenni di dinamica molecolare

Nel citocromo c ridotto, la sommità della fessura dell'eme è chiusa; è questo un aspetto strutturale che ha senza dubbio un grande significato fisiologico. La catena, dai residui 80 fino all'83, si sposta a destra (*come appare nella figura a pagina 50*), e la sporgenza della fenilalanina 82 entra nella fessura a sinistra dell'eme, quasi parallelamente a esso: l'eme viene cosí a trovarsi virtualmente escluso dal mondo esterno. La conservazione assoluta nella molecola ossidata di questa catena laterale di fenilalanina durante tutta l'evoluzione, in un ambiente energeticamente sfavorevole, dice che la chiusura della fessura dell'eme nella molecola ridotta è importante per la sua attività biologica. Possono essere avanzate alcune spiegazioni: l'anello aromatico della fenilalanina 82 può partecipare al meccanismo di trasferimento degli elettroni, oppure può essere necessario il suo allontanamento dalla fessura dell'eme per permettere a un gruppo che trasferisce elettroni di affiancarsi all'eme o almeno avvicinarsi al suo bordo. Al limite, il ripiegamento del tratto 80-83 della catena può essere un movimento convulso tendente ad allontanare il complesso dell'ossidasi dalla proteina, dopo che il trasferimento degli elettroni è già avvenuto per altra via.

Questo articolo è già abbastanza teorico per non dover operare una scelta fra queste o altre alternative. In questo stadio, mentre si stanno approfondendo le analisi ad alta risoluzione di entrambe le forme, ossidata e ridotta, del citocromo c, basta dire che nessun'altra proteina presenta un cambiamento strutturale cosí importante come quello del citocromo c quando passa da uno stato di ossidazione all'altro: la fenilalanina 82 si sposta in una posizione completamente nuova e altri anelli aromatici, compresi i tre del canale sinistro, modificano il loro orientamento. Quando la molecola è ridotta, il canale destro appare parzialmente bloccato dai residui 20 e 21. Oggi abbiamo la descrizione di un antichissimo motore molecolare a due tempi. Speriamo di poterne capire in futuro il funzionamento.

Come le api difendono l'ambiente dell'alveare

Le api regolano in maniera efficiente la temperatura e l'umidità, eliminano l'aria inquinata, allontanano gli oggetti estranei, le scorie e i corpi dei morti e tengono sotto controllo i parassiti e gli agenti patogeni

di Roger A. Morse

Una colonia di api mellifiche può comprendere perfino cinquantamila individui, che vivono insieme in condizioni di affollamento notevolmente superiore a quello che si è mai verificato per gli esseri umani. In piú, le api sono in grado di mantenere costante l'ambiente della loro colonia: possono regolare la temperatura e la umidità, eliminare l'aria inquinata, allontanare gli oggetti estranei, le scorie e i corpi dei morti e, inoltre tenere sotto controllo la maggior parte dei parassiti e degli agenti patogeni che assalgono non soltanto loro, ma anche le riserve alimentari accumulate nell'alveare. Come possono le api svolgere tutte queste attività?

Una colonia di api è formata dalla regina, da un vasto schieramento di operaie e, in una parte dell'anno, da un massimo di tremila fuchi. Il compito di questi ultimi è di accoppiarsi con la regina; in realtà solo sei-otto di essi lo fanno mentre i rimanenti individui sono superflui. In autunno sono tutti estromessi dalla colonia.

Le tre caste vivono in una cavità naturale o in un'arnia costruita dall'uomo. In natura sembrano prediligere gli alberi cavi. Le api costruiscono generalmente i favi in luogo buio: la luce sembra inibire tale attività. Ne risulta che raramente esse li costruiscono in aree esposte dove la colonia non potrebbe sopravvivere durante l'inverno.

La fotografia della pagina a fronte rappresenta l'interno di un alveare. Si può notare l'assenza di qualunque oggetto estraneo, che viene immediatamente allontanato dalle api. Le cellette vengono utilizzate per l'immagazzinamento del polline e del miele. Il polline fornisce alle api proteine e grassi e il miele zuccheri. Il polline viene difeso lasciando libero un quinto di spazio della celletta che viene quindi colmata con miele e cera.

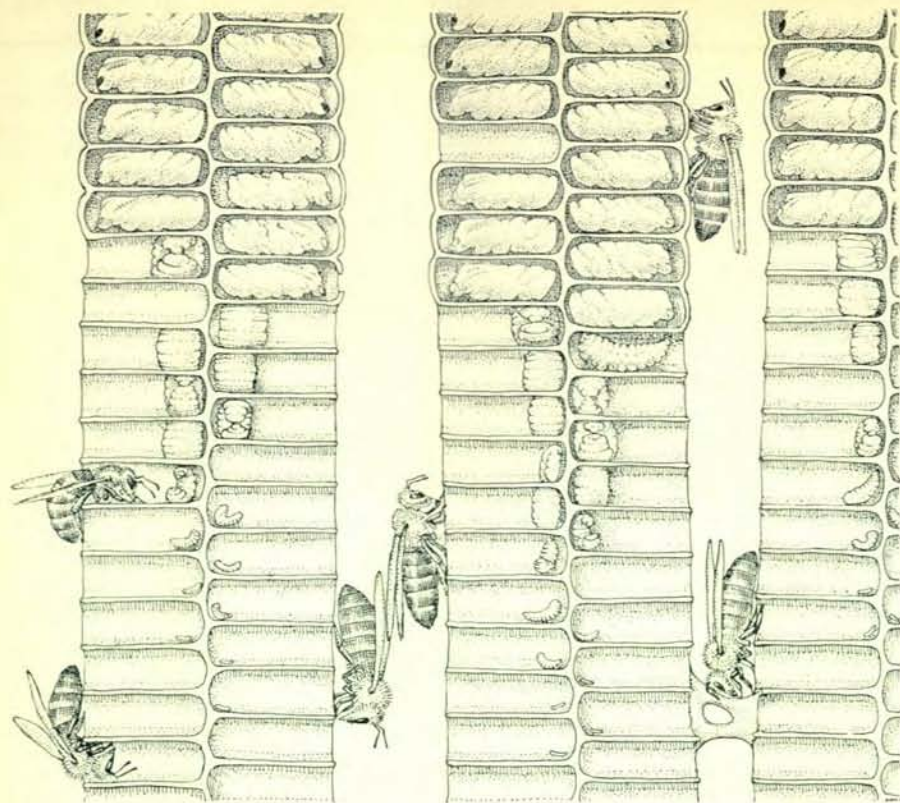
Il miele viene accumulato dalle api come riserva per il periodo in cui non è possibile procurarsi nettare dai fiori. Esso è il loro principale alimento: una colonia normale metterà da parte una riserva di miele di 7-50 kg. Negli Stati Uniti settentrionali una colonia richiede perlomeno 30 kg di miele per superare l'inverno.

Le api traggono le proteine dal polline. La riserva di polline di una colonia varia in genere tra mezzo chilogrammo e 7,5 kg. Miele e polline sono i soli alimenti delle api e ambedue vengono immagazzinati nelle cellette dei favi. Il miele è ricchissimo di zucchero e il polline di proteine e di grassi; pertanto una simile riserva alimentare potrebbe costituire un'importante fonte di sostentamento anche per altri organismi. La protezione delle riserve di cibo contro gli animali piú grossi e i parassiti è quindi una questione di primaria importanza per la sopravvivenza della colonia.

Il rifugio generalmente prescelto in natura dalle api è sufficientemente solido da proteggere il nido contro l'attacco di altri animali. Se tuttavia esso non offre sufficiente protezione, una seconda linea di difesa è rappresentata dai pungiglioni. Perfino in inverno, quando hanno una temperatura troppo bassa per poter volare, le api protendono i loro pungiglioni; una massa di api infreddolite e riunite a grappolo ricorda un porcospino. Qualunque animale che le tocchi è destinato a ritrarsi rapidamente.

La protezione delle riserve contro i parassiti tipo batteri richiede l'intervento di altri meccanismi. Il problema è aggravato dal fatto che le api, durante un periodo di circa dieci mesi all'anno in cui allevano le larve, mantengono nel nido una temperatura di circa 33 °C. Anche l'umidità viene mantenuta a livelli elevati sebbene entro limiti piú ampi. Tali condizioni sarebbero favorevoli anche per la crescita di lieviti e batteri, se la colonia di api non fosse dotata di meccanismi protettivi.

L'esame di tali meccanismi ebbe inizio presto, in questo secolo, in coincidenza con l'emanazione di leggi sulla purezza dei cibi e delle sostanze medicamentose. A quel tempo si riponeva molto interesse nei cibi come possibili vettori di febbre tifoide e di altre malattie infettive. Nel 1919 Walter G. Sackett del Colorado Agricultural College studiò il miele come possibile vettore di malattie intestinali. Egli introdusse in esso dieci diversi microrganismi, tra cui quelli che causano la febbre tifoide e la dissenteria batterica. Egli introdusse gli stessi batteri anche in miele diluito con acqua e trovò che, nel prodotto non diluito, i microrganismi morivano nello spazio di due giorni, mentre nel miele diluito fino a una concentrazione zuccherina pari al 60 per cento dell'originale, essi morivano entro un giorno (il miele non diluito contiene solidi – prevalentemente zucchero – per l'82-84 per cento). Nelle soluzioni di miele con meno del 50 per cento di parte solida, gli organismi morivano piú lentamente ma ancora in una soluzione con il 10 per cento di miele essi erano uccisi entro pochi giorni.

Sackett trovò « piuttosto sorprendente » l'incapacità dei microrganismi di prosperare nel miele, particolarmente nel miele diluito. L'unica ipotesi che egli riuscí ad avanzare era che il fenomeno fosse collegato allo stato fisico delle particelle di zucchero nel miele. Ulteriori indagini hanno messo in evidenza un meccanismo antibatterico collegato con il fatto che il miele

Lo « spazio per le api » è costituito dai corridoi che le api mantengono attorno ai favi e tra di essi. Esso varia tra i 60 e i 90 mm. Spazi piú grandi sono riempiti dai favi, spazi piú piccoli sono tappati con una resina chiamata propoli (*in basso a destra*). Il propoli ha anche la funzione di tappare fessure che possono ospitare microrganismi.

ha un basso contenuto d'acqua e un'elevata pressione osmotica. In un simile ambiente, la pressione osmotica, derivante dall'equilibrio tra la quantità d'acqua nelle cellule batteriche e la quantità d'acqua presente nel miele, fa sí che l'acqua venga risucchiata fuori dalle cellule batteriche. Si determina cosí un effetto battericida o batteriostatico: alcuni batteri vengono uccisi e altri, benché rimangano vitali, non sono piú in grado di accrescersi. Pertanto la pressione osmotica rende ragione dell'incapacità dei batteri di prosperare nel miele non diluito.

Dovette passare molto tempo prima che si riuscisse a individuare il meccanismo che spiega l'effetto piú massiccio sui batteri del miele diluito solo in parte. Nel 1937, sperimentatori tedeschi richiamarono l'attenzione sull'effetto battericida del miele definendolo effetto « inibina ». Il laboratorio che stava indagando sul fenomeno fece sapere che qualunque cosa provocasse l'effetto era distrutta dal calore e dalla luce. Tale risultato fu confermato in altri laboratori e difatti il « tasso di inibina », una misura dell'attività battericida, fu utilizzato in alcuni paesi fin dagli anni trenta per indicare la qualità del miele.

Nel 1962 Jonathan W. White del Dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti ha trovato che il miele contiene l'enzima glucosioossidasi, aggiuntovi dalle api operaie. La glucosioossidasi attacca il glucosio, che è uno dei due zuccheri comunemente presente nel miele (l'altro è il levulosio, una forma di fruttosio). Nel processo viene emesso perossido di idrogeno (acqua ossigenata), che naturalmente è un potente battericida. La scoperta di White ha messo in luce la base reale dell'effetto inibina.

White ha trovato inoltre che la glucosioossidasi è ampiamente inattiva nel miele comune, avente un contenuto di acqua pari al 19 per cento o anche meno. Egli ha dimostrato che, quando il miele è diluito, la produzione di perossido di idrogeno aumenta rapidamente: sta dunque qui la ragione del maggior effetto battericida del miele diluito. (Un fatto interessante è che, nella colonia, il miele fornito alle larve sia diluito dalle nutrici che si occupano della loro alimentazione.)

La glucosioossidasi non si trova di solito negli insetti o associata a essi. Non se ne fa alcun riferimento nei testi standard di fisiologia degli insetti. Sarebbe utile sapere, invece, quanto estesamente essa sia utilizzata dagli insetti che raccolgono e immagazzinano cibo, includendo nel novero le formiche e le api solitarie e semisociali.

Un'attività antibiotica è messa in evidenza nella pappa reale, la sostanza cremosa e ricca che le api operaie secernono da ghiandole presenti nel loro capo e con la quale nutrono le larve (le larve destinate a diventare regine ricevono piú pappa reale di quelle destinate a diventare operaie: questa diversità di trattamento è di cruciale importanza, derivando le due categorie dallo stesso tipo di uova). Nel 1959 Murray Blum e Arthur F. Novak dell'Università di Stato della Louisiana e Stephen Taber III del Dipartimento di Agricoltura hanno trovato che la pappa reale conteneva un acido grasso con proprietà antibiotiche. Questo antibiotico aveva un'efficacia contro i microrganismi esposti a esso pari solo al 20-25 per cento della penicillina e della clorotetraciclina, tuttavia la sua attività risultava ancora sufficientemente elevata da conferire alla pappa reale un considerevole potere protettivo contro i batteri.

Un altro agente antibatterico che opera in favore della colonia è la naturale acidità del miele. Per molti microrganismi un ambiente acido è inospitale. Certi lieviti, tuttavia, lo tollerano e pertanto sono presenti nel miele. A causa dell'elevata pressione osmotica di questo prodotto si distinguono lieviti di tipo osmofilo, cosí definiti perché vivono o prosperano in un mezzo che presenta un'elevata pressione osmotica.

La massima parte dei lieviti, tra cui quelli per la panificazione e per la fermentazione della birra e del vino, appartengono al genere *Saccharomyces*. Essi non possono accrescersi o moltiplicarsi in soluzioni che contengano piú del 30 per cento di zucchero. I lieviti osmofili, appartenenti al genere *Zygosaccharomyces*, non crescono, invece, in soluzioni zuccherine diluite. Essi prosperano soltanto in prodotti come lo sciroppo di zucchero d'acero, che ha una concentrazione zuccherina pari a circa il 66 per cento, e nel miele – ammesso che questo contenga piú del normale quantitativo d'acqua che è di circa il 19 per cento.

Le norme del Dipartimento dell'Agricoltura statunitense per la graduazione stabiliscono che il miele di grado A deve contenere meno del 18,6 per cento di acqua. Il nettare che le api raccolgono in natura contiene generalmente tra il 10 e il 50 per cento di zucchero; il rimanente contenuto è prevalentemente acqua. Le api fanno « maturare » il nettare riducendone il

grado di umidità, sia riscaldando l'alveare sia facendo passare notevoli volumi di aria sopra le goccioline di miele che sono state poste nelle cellette del favo. Ulteriori fasi della lavorazione sono visibili tra le api di casa che ricevono il nettare dalle bottinatrici: esse lo lavorano con la loro lunga lingua, lo ingoiano, lo rigurgitano, ne formano una gocciolina sulla sommità stessa della lingua, che poi rinviano nella borsa melaria. Questo ripetuto trattamento del miele elimina acqua e introduce in esso enzimi.

Fortunatamente sia per le api sia per gli apicoltori il miele normale, contenente meno del 19 per cento di acqua, non fermenta anche se contiene lieviti. L'elevata pressione osmotica e la mancanza di acqua impedisce a questi microrganismi di crescere, anche se essi rimangono in vita. La fermentazione nelle riserve di miele può costituire un problema per le api, ma più spesso affligge gli apicoltori, dopo che essi lo hanno tolto dalle arnie. Il miele è igroscopico e assorbe umidità dall'aria. Quando cristallizza, come generalmente fa essendo una soluzione zuccherina soprasatura, un certo quantitativo di acqua viene incorporato nei germi cristallini, tuttavia in proporzione inferiore al quantitativo che si trova complessivamente nel miele, cosicché la porzione liquida del miele parzialmente cristallizzato ha un contenuto d'acqua più elevato del miele prima che cominci la cristallizzazione. Non appena il contenuto d'acqua della porzione non cristallizzata sale al disopra del 19 per cento circa, i lieviti osmofili cominciano a moltiplicarsi (a meno che non siano stati uccisi dal trattamento termico) e la fermentazione si fa evidente.

Nelle colonie con un'elevata popolazione di api l'alta temperatura all'interno favorisce l'eliminazione dell'umidità in eccesso. Nelle colonie che non possono proteggere tutte le loro riserve alimentari, o perché sono troppo abbondanti o perché la popolazione di api è troppo esigua, si può notare la formazione di bolle d'anidride carbonica che compaiono come effetto della crescita dei lieviti nel miele. Il miele che fermenta percolerà dalle cellette e scorrerà lungo la superficie del favo, dove probabilmente assorbirà altra umidità. A questo punto il sistema della glucosioossidasi offre un certo grado di protezione, anche se, sul miele diluito, possono comunque comparire muffe. L'alcool prodotto dai lieviti è attaccato dall'*Acetobacter*, l'organismo che trasforma l'alcool in acido acetico o aceto. L'odore di aceto può attrarre le mosche, particolarmente il moscerino della frutta (*Drosophila*). In queste rare circostanze, le riserve alimentari di una colonia di api possono venir distrutte per mancanza di un sistema che migliori le condizioni igieniche e di difesa.

Il miele che si trova in commercio è generalmente pastorizzato per impedirne la fermentazione. Il trattamento richiede un riscaldamento del prodotto per 30 minuti a 60 °C, oppure per 1 minuto a 71 °C, o combinazioni intermedie di tempo e di temperatura. Un simile trattamento distrugge anche la glucosioossidasi. Alcuni pensano che esso danneggi il miele, ma quest'affermazione è discutibile. Certamente un surriscaldamento può provocare un'alterazione del suo sapore.

Come fanno le api a proteggere le loro riserve di polline? Di nuovo i meccanismi sono vari. Uno di essi è il sistema della glucosioossidasi, che entra in gioco in quanto le api addizionano nettare o miele al polline quando lo raccolgono.

Nel 1966 Janine Pain e Jacques Maugenet, della Stazione governativa di ricerche sulle api a Bures-sur-Yvette vicino a Parigi, hanno trovato che i batteri che producono acido lattico (*Lactobacillus*) servono a proteggere il polline immagazzinato nell'alveare. L'acido lattico permette di insilare naturalmente il miscuglio di pollini, proteggendolo dalla distruzione operata da altri agenti microbici. Anche altri batteri (*Pseudomonas*) e lieviti comuni (*Saccharomyces*) sono stati trovati in tali riserve. Probabilmente *Pseudomonas* agisce eliminando l'ossigeno, il che rende il polline un mezzo di crescita migliore per il *Lactobacillus*. Il lievito serve apparentemente a degradare il polline, rendendo più facile la sua utilizzazione da parte delle api.

Le cellette del miele nel favo sono ripiene fino all'orlo mentre quelle che contengono il polline non lo sono mai più del 75-80 per cento della loro profondità totale. Quando il polline viene consumato rapidamente, come accade all'inizio della primavera per l'allevamento delle larve, vi è scarso pericolo di deterioramento perché le riserve sono sostituite rapidamente. Se il polline viene immagazzinato, invece, a tempo indefinito, come accade in inverno per le prime attività di primavera, le cellette contenenti il polline richiedono una maggiore protezione e vengono ricoperte di miele e quindi chiuse con tappi di cera. È questo il motivo per cui esse sono solo in parte riempite con il prodotto. L'aggiunta di miele e di un tappo favorisce la protezione della celletta contro la contaminazione e il deterioramento del polline provocato dai batteri.

L'immagazzinamento delle riserve in base al colore è evidentemente un altro espediente protettivo messo in atto dalle api. Una data celletta viene riempita di polline o di miele di un dato colore: si nota qui una riserva di polline. Il procedimento serve presumibilmente a proteggere la colonia attraverso la separazione del cibo proveniente da differenti fonti, nel caso che quello proveniente da una particolare fonte abbia scarse qualità di conservazione. Dato che l'interno di un alveare è generalmente buio, alla base del procedimento deve operare l'odore del cibo che costituisce la riserva.

Il propoli riempie lo spazio tra due assi in un'arnia. Esso deriva da gomme e resine che le api raccolgono su alberi quali il pino e il pioppo. Dopo essere rimasto esposto all'aria, già all'interno dell'arnia, esso si essicca e forma uno strato rigido.

Un'altra misura protettiva sembra insita nel fatto che le api immagazzinano miele e polline in base al colore: una data celletta conterrà miele o polline di un dato colore (dato che c'è buio nell'alveare, bisogna ammettere che pollini e mieli di diverso colore abbiano anche diverso odore, per poter offrire alle api la possibilità di discriminazione). Sembra probabile che questa separazione del cibo proveniente da diverse fonti serva anche a proteggere la colonia nel caso in cui il cibo proveniente da una qualsiasi fonte abbia scarse qualità di conservazione.

Può darsi che alcuni apicoltori, non avendo tenuto in debito conto la capacità delle api nel distinguere i colori, abbiano contribuito al cattivo funzionamento del sistema che migliora le condizioni igieniche di una colonia. In un apiario le colonie possono trovarsi anche soltanto a 30-60 cm di distanza tra loro, una situazione che non si verifica mai in natura. Pertanto un'ape che ritorna all'alveare può entrare in un nido che non sia il suo. Essa viene di solito accettata, in particolare se porta un carico di nettare e di polline. Se l'ape smarritasi stava però svolgendo una funzione di ripulitura, per esempio aveva allontanato dall'alveare una larva o un adulto morti, penetrando in un alveare sbagliato essa può diffondere la malattia che aveva ucciso quell'insetto. Si ritiene che la peste americana, una malattia batterica delle larve delle api mellifiche, si sia diffusa proprio in questo modo. Dato che appunto nel fatto che le api riconoscano il loro nido consiste parte del sistema di miglioramento delle condizioni sanitarie, si consiglia agli apicoltori di dipingere le arnie con diversi colori e di mettere delle segnalazioni, per esempio alcuni alberelli, in modo da facilitare il riconoscimento e il ritorno al giusto nido.

Se si mette un poco di erba o di paglia in un alveare proprio sotto il coperchio, si può osservare, tenendo d'occhio l'ingresso, un'ape che elimina questo materiale dall'arnia nello spazio di cinque minuti. Inoltre, se la massa è sufficientemente piccola da poter essere trasportata in volo dall'ape, essa la porterà almeno a 15 metri di distanza dall'arnia prima di lasciarla cadere. Se essa invece è troppo pesante per poter essere trasportata in volo, l'ape cercherà perlomeno di trasportarla per varie decine di centimetri dall'ingresso, trascinandola sul terreno.

Se si segue quest'operazione di ripulitura in un'arnia costruita appositamente per l'osservazione, cioè con pareti di vetro, salta all'occhio un interessante comportamento delle api. La prima ape a individuare e ad afferrare l'oggetto estraneo non è generalmente quella che poi vola fuori con esso. I miei studenti della Cornell University, che eseguono questo esperimento come parte di un corso di esercitazioni, hanno osservato che fino a cinque api (la media è tre) partecipano alla rimozione di un singolo detrito anche se la distanza del luogo dove l'oggetto è stato introdotto dall'uscita dell'arnia supera raramente i 30 cm. Generalmente un'ape per volta afferra l'oggetto. Alla fine una sola operaia lo trasporta via dall'ingresso, dato che non tutte sanno dove quest'ultimo sia.

Nell'attività di allontanamento dei corpi estranei dall'arnia, emergono tre punti relativi al sistema di ripulitura dell'arnia stessa da parte della colonia. Il primo punto è che la massima parte delle api in un alveare entra velocemente in azione contro un oggetto estraneo: qualunque ape incontri un

oggetto estraneo lo porterà perlomeno distante dal punto in cui essa lavora. Il secondo punto è la priorità che le api operaie danno ai compiti di emergenza, quale la rimozione di un oggetto estraneo. Anche se un'ape ha già un'occupazione, passerà in qualunque momento a una di queste incombenze. Collettivamente tale fatto è importante in tempi di pericolo per l'alveare, quando può sorgere un'improvvisa necessità di sorveglianza, di difesa attiva, di ventilazione di esso e cosí via. Il terzo punto è che gli oggetti estranei non vengono semplicemente allontanati dall'alveare, ma sono portati a una certa distanza cosicché, se rappresentano una fonte di pericolo o d'infezione, essi siano resi praticamente inoffensivi.

Le api dispongono di un altro meccanismo per migliorare le condizioni igieniche del loro ambiente basato sull'impiego di gomme e resine che si procurano da alberi tipo pino o pioppo. Questo materiale, che gli apicoltori chiamano propoli, serve a proteggere l'alveare in parecchi modi. Un effetto è provocato dal fatto che le resine contengono terpeni, i quali hanno un potere sia battericida sia batteriostatico. Il propoli viene utilizzato inoltre dalle api per rivestire di uno strato resistente superfici e oggetti che potrebbero rappresentare un rischio per la salute dell'intera colonia.

Le resine vegetali, essendo gommose e appiccicose, non vengono raccolte con facilità dalle api. Un'operazione importante che svolgono le api di casa è appunto quella di togliere il propoli dalle api bottinatrici che lo portano all'alveare. Un'ape bottinatrice si serve delle mandibole e delle zampe per lavorare il propoli e riporlo poi negli appositi cestelli sulle zampe posteriori. L'ape bottinatrice tornata all'alveare, si attacca al favo o a una parte dell'arnia mentre parecchie api di casa traggono dai cestelli lunghi fili di propoli. Dopo esposizione all'aria, questo materiale si secca e forma una superficie resistente.

Grossi insetti o piccoli animali che penetrino in un alveare (sia per errore sia in cerca di cibo) vengono generalmente uccisi dalle api e poi, essendo troppo voluminosi per poter essere rimossi, vengono avvolti nei propoli e non è raro per gli apicoltori trovarne qualcuno. Lo strato di propoli, avente generalmente uno spessore di almeno un millimetro e mezzo, serve a eliminare ogni odore e, di fatto, l'animale morto.

Se si mette un oggetto ruvido, per esempio un frammento di legno non levigato, in un'alveare, le api lo ricopriranno di propoli, rendendone cosí liscia la superficie. Le operaie si servono del propoli anche per tappare fessure nella parete dell'arnia. Di fatto, esse tappano con propoli qualsiasi spazio che sia troppo piccolo per servire come « spazio per le api » – secondo la definizione degli apicoltori – cioè quelle specie di corridoi che le api mantengono attorno e tra i favi per avere spazio sufficiente per operare e per camminare. Questo spazio è largo circa 60-90 mm; uno spazio più ampio serve per costruire un favo, uno più piccolo deve essere tappato con propoli.

La durata della vita di un'ape operaia durante l'estate è di circa sei settimane. In una colonia la mortalità può quindi essere superiore a 1000 individui al giorno nella stagione di massima attività, ma se si controlla il terreno vicino all'ingresso di un'alveare non si troverà in genere più di una o due api appena morte al giorno. In molti casi accade infatti che le api operaie muoiano durante le loro escursioni in natura. Esse non « si mettono in pensione » o riducono la loro attività in età avanzata, ma semplicemente continuano a lavorare fino a quando muoiono. Indagini di laboratorio hanno messo in evidenza che le vecchie api possono soffrire di una varietà di malattie, molte delle quali infettive: il fatto che muoiano lontane dal nido in numero cosí elevato sembra costituire un ulteriore meccanismo di difesa per l'alveare.

Se un'ape muore nell'alveare, il suo corpo viene trattato come oggetto estraneo. Le operaie lo portano all'ingresso e quella che si invola con esso lo porta a una considerevole distanza dal nido prima di lasciarlo cadere. La tendenza delle api non è tanto quella di mantenere il terreno vicino all'ingresso dell'arnia pulito (anche se, nel caso che tale ingresso sia vicino al suolo, includono l'area tutt'attorno nelle operazioni di ripulitura), quanto quella di compiere le loro attività in modo tale che il terreno vicino all'alveare non si sporchi.

La ventilazione ha un posto importante nel programma di miglioramento sanitario di una colonia di api.

È facile vedere delle operaie che ventilano il loro alveare in una giornata calda. Esse si affollano all'ingresso, aggrappandosi con le zampe al bordo inferiore, in modo da mantenersi in equilibrio, e muovono rapidamente le ali. In un alveare standard l'aria sarà spinta all'interno da una parte dell'ingresso e sarà fatta uscire dall'altra parte. È possibile soffiare un poco di fumo all'interno di un'arnia attraverso un foro fatto per questo scopo e osservare come esso venga spinto verso l'esterno, in corrispondenza dell'entrata o di un altro punto, in seguito a una ventilazione operata come risposta dalle api.

Un importante contributo al mantenimento della pulizia nella colonia proviene dal fatto che le api non emettono feci quando si trovano nell'alveare. Esse lo fanno solo in volo e quando si trovano a una certa distanza dal nido. Di conseguenza, talvolta si crea un problema per la colonia durante l'inverno, quando una successione di giorni freddi impedisce alle api di uscire. Se esse restano per troppo tempo al chiuso, può capitare che una emetta le proprie feci nel nido. In tal caso, altre api in poco tempo fanno lo stesso e, nello spazio di poche ore, l'ordine sociale della colonia si infrange. In queste circostanze, la colonia va in rovina nello spazio di pochi giorni. Una giornata calda ogni tanto o perlomeno una parte della giornata – come minimo circa mezz'ora – è assolutamente necessaria per la sopravvivenza di una colonia di api durante l'inverno

Un punto ancora irrisolto è che cosa le api facciano delle feci della regina. Una regina prende il volo solo per andare a nozze, quando ha un'età da sei a dodici giorni; solo in rari casi essa abbandona il nido per accompagnare uno sciame in un nuovo alveare. Si ammette generalmente che le operaie rimuovano le sue feci. Tuttavia, per quanto ne so io, nessuno ha mai visto una regina emettere feci o un'operaia che le allontani dal nido.

Non vorrei lasciare l'impressione che le api non abbiano importanti problemi di malattie. Le api soffrono, infatti, di una varietà di malattie battericiche, fungine, virali e protozoarie; soffrono inoltre dell'attacco di certi agenti infestanti. L'uomo ha poi complicato il problema ammassando le colonie di api in apiari. Cionondimeno con misure appropriate è generalmente possibile mantenere un buono stato di salute anche in essi. I mezzi messi in atto dalle api stesse contribuiscono in maniera significativa alla buona salute della colonia. L'ape è un esempio di animale che ha elaborato validi sistemi di protezione per il proprio organismo, il proprio nido e le proprie riserve alimentari contro gli attacchi e i danni provocati dai predatori, dai parassiti e dai microrganismi.

Superconduttori per la trasmissione di energia elettrica

La crescente richiesta di energia elettrica è in conflitto con le critiche mosse alle linee di trasmissione. Conduttori sotterranei refrigerati e superconduttori potrebbero rappresentare una soluzione del problema

di Donald P. Snowden

Nel corso di questo secolo il consumo di energia elettrica negli USA è raddoppiato pressappoco ogni dieci anni. Sebbene preoccupazioni di carattere ecologico e ritardi nelle realizzazioni possano tendere a ridurre di un poco, nel prossimo futuro, questo tasso di crescita, sembra ancora verosimile che il consumo si quadruplicherà nei prossimi due decenni. La richiesta di energia elettrica cresce due volte piú in fretta del prodotto nazionale lordo, e tre volte piú in fretta della popolazione. Si può ragionevolmente ritenere che nel decennio in corso la capacità installata di produzione di energia elettrica aumenterà da 300 000 megawatt, dato relativo al 1970, a circa 600 000 megawatt nel 1980. Nello stesso periodo il consumo annuale pro capite salirà dagli attuali 6-7000 chilowattora a piú di 10 000. Per poter far fronte a questo tasso di crescita, l'industria elettrica dovrà installare negli USA, nel solo anno 1980, 25 000 megawatt di capacità produttiva, con annesse reti di trasmissione e di distribuzione, per una spesa complessiva stimabile in 13 miliardi di dollari. Il corrispondente investimento nel 1970 è stato di 7,4 miliardi di dollari.

Trovare ubicazioni soddisfacenti per le nuove centrali elettriche, nonché appropriati tracciati per le nuove linee di trasmissione, si sta rivelando difficoltoso, ed è probabile che ancor piú lo diventi nei prossimi anni. Il desiderio dell'opinione pubblica di avere le centrali elettriche ben lontane dai centri abitati contrasta direttamente con l'opportunità di non deturpare il paesaggio con chilometri e chilometri di linee aeree ad alta tensione. Anche se tutte le centrali elettriche fossero installate entro limiti urbani, occorrerebbero sempre estese reti di collegamento per suddividere i carichi fra i diversi sistemi. La soluzione ovvia è di sistemare gli elettrodotti sotto terra. Allo stato attuale della tecnologia relativa, il costo di questa soluzione risulta tuttavia proibitivo.

Probabilmente le maggiori speranze di abbassare il costo delle reti sotterranee sono affidate allo sviluppo di una tecnologia basata sui superconduttori: conduttori che possano operare con perdite resistive estremamente basse (non necessariamente nulle del tutto), una volta che essi siano stati raffreddati a temperature comprese tra 4,2 e 20 °C sopra lo zero assoluto. Come vedremo poi, i sistemi superconduttori potranno essere competitivi con altri sistemi ad alta capacità, nei quali i conduttori sono pure refrigerati, ma non fino al punto da diventare superconduttori.

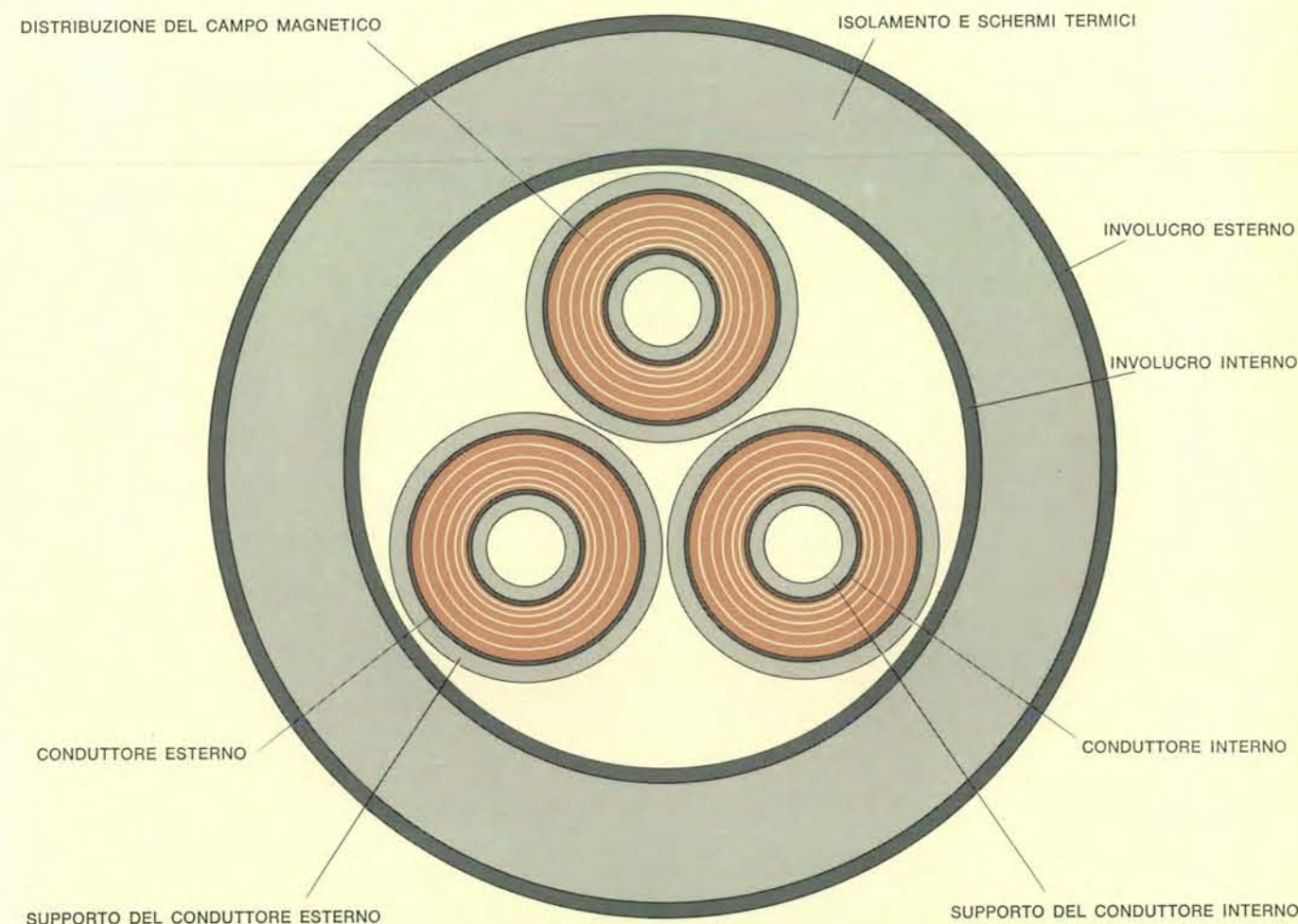
Nell'industria per la produzione e la distribuzione dell'energia elettrica si fa distinzione fra i sistemi di trasmissione, che convogliano grosse quantità di energia fra le centrali di produzione e i maggiori centri di consumo o fra diversi punti della rete per necessità di suddivisione dei carichi, e i sistemi di distribuzione, che portano l'energia al singolo consumatore. Come regola generale le linee che operano a 140 000 o piú volt sono considerate facenti parte del sistema di trasmissione. Le linee di distribuzione generalmente lavorano a tensioni piú basse, e in molte città vengono ormai installate sotto terra. La tecnologia richiesta per questi sistemi di distribuzione a bassa tensione e a bassa potenza è tuttavia molto meno complessa che non quella necessaria per i sistemi di trasmissione.

Cosí come le nuove centrali elettriche sono sempre di maggiore potenza, per trarre profitto dalle maggiori economie ottenibili con le piú grandi dimensioni, cosí anche le linee di trasmissione sono state via via progettate per operare a tensioni sempre piú alte. Quanto maggiore è la tensione, tanto piú grande risulta la capacità di carico. La piú alta tensione in uso oggigiorno per linee aeree è di 500 000 volt; circa 8000 chilometri di linee di trasmissione lavorano negli USA a tale tensione. Recentemente è stata posta in servizio una linea a 750 000 volt lunga poche centinaia di chilometri. Sono allo studio sistemi capaci di lavorare a 1,5 milioni di volt. Sebbene per molti anni ancora le linee aeree di trasmissione potranno essere tollerate in località remote, continuare a far uso di esse dentro o nelle vicinanze di grossi centri abitati, appare oggi sconsigliabile, almeno per le nuove installazioni.

Attualmente il costo di un sistema di trasmissione dipende principalmente dalle condizioni locali. Negli USA i costi vengono comunemente espressi in termini di un chilometro di linea per milione di voltampere, quest'ultimo valore rappresentando il prodotto della tensione di lavoro della linea per l'intensità di corrente. A titolo di esempio, una linea aerea a 350 000 volt costa circa 50 dollari per milione di voltampere e per chilometro. Un carico ottimale per una tale linea è di circa 600 milioni di voltampere, il che porta a un costo di 30 000 dollari circa per chilometro. Una linea sotterranea di uguale capacità, realizzata con le tecniche attuali, costerebbe 750 dollari per milione di voltampere e per chilometro; ovvero, per il carico prima citato, circa 450 000 dollari per chilometro. Questi costi non comprendono però i compensi per il diritto di transito. Si ritiene pertanto che i crescenti costi del terreno, combinati con la pressione dell'opinione pubblica contraria alle installazioni aeree, creeranno un mercato per linee di trasmissione sotterranee dell'ordine di un miliardo di dollari per il 1980. Se ne deduce che l'industria dell'energia elettrica ha un considerevole interesse nel trovare strade che riducano il costo di installazione delle linee sotterranee ad alta potenza.

Nel valutare nuove tecnologie di trasmissione dell'energia le società stanno esaminando molto da vicino anche i vantaggi che possono essere offerti dai sistemi a corrente continua. Storicamente si è quasi sempre usata esclusivamente la corrente alternata, per la grande facilità con la quale le tensioni di una linea a corrente alternata possono essere ridotte o aumentate mediante l'uso di trasformatori. Salvo che in casi del tutto speciali, sarà sempre la corrente alternata a essere fornita al consumatore. Però per trasportare grandi quantitativi di potenza da punto a punto, la corrente continua presenta tre importanti vantaggi.

Il primo di essi è rappresentato dal fatto che la corrente continua abbisogna di soli due conduttori, mentre la corrente alternata ne richiede tre, uno per ogni fase, nel tipico sistema trifase. Il secondo vantaggio consiste nell'eliminazione dei problemi relativi alle linee operanti con corrente alternata. Nelle linee aeree il campo magnetico che si crea, annullato e ricreato attorno al conduttore per il fatto che la corrente si alterna da positiva a negativa cinquanta volte al secondo, induce nel conduttore una caduta di tensione fuori fase che riduce la quantità di energia che può essere consegnata al consumo. In un cavo, dove i tre conduttori di un sistema a corrente alternata sono schermati da una armatura messa a terra, il mantenimento di un campo elettrico alternato fra ciascun conduttore e la terra, richiede che si generi una corrente fuori fase nel conduttore. Tutto ciò riduce la quantità di corrente disponibile per l'assorbimento attivo. Questi effetti possono essere cancellati installando apparecchiature speciali che aggiungano capacitanza per bilanciare l'induttanza in reti aeree, e aggiungano induttanza per bilanciare la capacitanza in reti sotterranee; ma simili apparecchiature sono costose. In parte per questi problemi, le piú lunghe reti sotterranee attualmente in servizio al di sopra di 230 000 volt superano raramente i 40 chilometri.

Il terzo vantaggio della corrente continua su quella alternata si manifesta quando si desidera interconnettere sistemi operanti a diverse frequenze o a diversi livelli di carico. In una rete interconnessa a corrente alternata tutti i generatori devono ruotare in modo sincrono e in fase fra di loro. Un inconveniente qualsiasi in un generatore può facilmente propagarsi lungo l'intero sistema, se non vengono previste opportune protezioni per un

Sezione trasversale di un cavo di trasmissione superconduttore. La corrente scorre nei tre conduttori centrali, che consistono ciascuno di un conduttore interno e di un conduttore esterno di ritorno. Il campo magnetico dovuto al passaggio della corrente rimane cosí confinato nello spazio compreso tra i due conduttori coassiali. Nei sistemi che utilizzano l'elio come refrigerante, esso occupa anche lo spazio tra il conduttore interno e quello esterno. Un isolamento termico contribuisce a mantenere bassa la temperatura. Un sistema come questo operante alla tensione di 140 chilovolt ha un diametro di 55 centimetri.

tempestivo sganciamento. Il problema può essere aggirato usando una connessione in corrente continua per collegare insieme due sistemi a corrente alternata.

Un esempio di tale soluzione è rappresentato dalla connessione in corrente continua, lunga solo 10 metri, che la New Brunswick Electric Power Commission sta attualmente installando in Canada come collegamento fra due sistemi a corrente alternata.

Se la connessione fosse stata effettuata in corrente alternata, ne sarebbe rimasta compromessa la stabilità dei due sistemi.

Questi tre vantaggi sono però annullati dall'alto costo di conversione della corrente alternata in continua per la trasmissione, e di nuovo da continua ad alternata per il consumo. Il costo di conversione è dell'ordine di 35 milioni di dollari per sistema, il che equivale al costo di una rete sotterranea di circa 80 chilometri. Come risultato si ha che la trasmissione dell'energia a mezzo di corrente continua può normalmente giustificarsi solo per linee che siano lunghe parecchie centinaia di chilometri. La più grossa rete in corrente continua è stata installata recentemente fra i generatori idroelettrici sul fiume Columbia, sulla costa nord-est del Pacifico, e quelli nel sud della California.

L'alto costo di un cavo convenzionale è da attribuirsi alla difficoltà di isolare adeguatamente i tre conduttori ad alta tensione, e di piazzarli fianco a fianco in un condotto del diametro di qualche decina di centimetri (*si veda la figura in questa pagina*). Ciascun conduttore consiste in un fascio di parecchie centinaia di cavi di filo di rame. Poiché la corrente alternata tende a fluire sulla superficie del conduttore (effetto pelle) i cavi sono usualmente ritorti lungo l'asse, cosicché la corrente è costretta a passare attraverso tutto il volume del conduttore. L'effetto pelle viene ulteriormente ridotto suddividendo il conduttore in settori circolari leggermente isolati tra di loro. L'intero conduttore viene avvolto con nastro di carta isolante. Infine il cavo così avvolto viene schermato con un rivestimento combinato di nastri di metallo e di plastica, mentre gli strati interni di carta vengono impregnati con olio isolante. Tre di tali cavi vengono posti in un tubo di acciaio, che viene riempito di olio isolante a una pressione compresa tra 13 e 15 atmosfere. Una cura meticolosa è richiesta sia nella preparazione che nell'installazione dei cavi, per evitare in modo assoluto l'umidità, che deteriorerebbe seriamente le caratteristiche isolanti del sistema.

La principale limitazione di un cavo sotterraneo è dovuta alla formazione di calore, causato dal moto di particelle cariche (ioni) o di molecole polarizzate (dipoli) nel campo elettrico attorno ai conduttori. Per una linea a 350 000 volt, operante alla capacità di progetto, questa perdita dielettrica, come viene chiamata, può ammontare anche a più di un terzo della perdita totale della linea. La temperatura alla quale un cavo sotterraneo lavora, e pertanto la perdita totale che può essere tollerata, sono funzioni delle proprietà termiche del terreno nel quale il cavo è sotterrato. La trincea che contiene la linea è generalmente riempita con sabbia ad alta conducibilità termica, in modo da poter asportare la maggior quantità di calore possibile, massimizzando così la capacità della linea di trasmissione.

Come conseguenza della formazione di calore, una linea sotterranea a 350 000 volt presenta normalmente una capacità di carico inferiore alla metà della capacità di una linea aerea con cavi di uguali dimensioni. Si può ottenere tuttavia una accresciuta capacità mediante circolazione e refrigerazione dell'olio isolante all'interno del tubo contenente i cavi, oppure anche facendo circolare un fluido frigorifero all'esterno del tubo. Per esempio, la Commonwealth Edison Company di Chicago ha recentemente attrezzato un cavo a 138 000 volt con un sistema di circolazione e di refrigerazione dell'olio aumentando la capacità da 200 a 300 milioni di volt-ampere.

Un cavo singolo non superconduttore del tipo attualmente in uso per la trasmissione di energia elettrica ad alta tensione sotto terra è costituito da un fascio di cavi di filo di rame, attorcigliati e separati gli uni dagli altri per contrastare la tendenza della corrente a scorrere sulla superficie del filo. Tre conduttori simili vengono meticolosamente isolati e disposti all'interno di un condotto in acciaio riempito con olio sotto pressione. L'olio pressurizzato migliora ulteriormente l'isolamento elettrico del sistema.

Un certo numero di sviluppi tecnologici fanno intravedere la possibilità di aumentare la capacità e di ridurre i costi relativi alle linee di trasmissione sotterranee. Una linea di sviluppo è quella di usare materiali isolanti con proprietà superiori a quelle della carta impregnata d'olio. Un materiale piuttosto promettente è il polietilene estruso. Per via della sua bassa costante dielettrica, esso potrebbe rendere possibile la confezione di un cavo in grado di trasportare un determinato quantitativo di energia a una distanza del 30 % maggiore di quella raggiungibile attualmente con un cavo isolato con carta e olio. Per di più la perdita dielettrica nel polietilene ammonta solo al 10 % di quella nell'isolamento a carta impregnata. Finora però non sono state ancora messe a punto tecniche soddisfacenti per estrudere polietilene privo di bolle o discontinuità, nelle dimensioni richieste per un cavo a 350 000 volt.

Ancor più promettenti potrebbero essere cavi nei quali azoto compresso o esafluoruro di zolfo venissero usati come mezzo isolante. Entrambi questi gas hanno una costante dielettrica pari a uno, equivalente cioè a quella del vuoto. Per di più in essi la bassa perdita dielettrica è accompagnata da buone proprietà di trasmissione del calore. Nonostante queste favorevoli caratteristiche, cavi ad alta capacità isolati con uno di questi gas richiederanno una refrigerazione forzata, per ovviare alla bassa conducibilità termica del terreno circostante. Una breve linea isolata con esafluoruro di zolfo è stata recentemente installata dalla Consolidated Edison di New York.

Poiché è indispensabile che una linea sotterranea ad alta capacità sia refrigerata, si dovrebbero ottenere sensibili vantaggi raffreddando la linea molto al di sotto della temperatura ordinaria del terreno, abbassando così la resistività dei metalli solitamente usati come conduttori. Per esempio, al punto di ebollizione dell'azoto, 77 gradi Kelvin (gradi centigradi al di sopra dello zero assoluto), la resistività dell'alluminio o del rame è ridotta di un fattore pari a dieci, fatto che giustificherebbe da solo il costo della refrigerazione. Il vantaggio che si avrebbe abbassando la temperatura a 20 gradi Kelvin, punto di ebollizione dell'idrogeno liquido, è ancor più grande: la perdita resistiva è ridotta di 500 volte, mentre il costo della refrigerazione cresce solo da 30 a 100 volte.

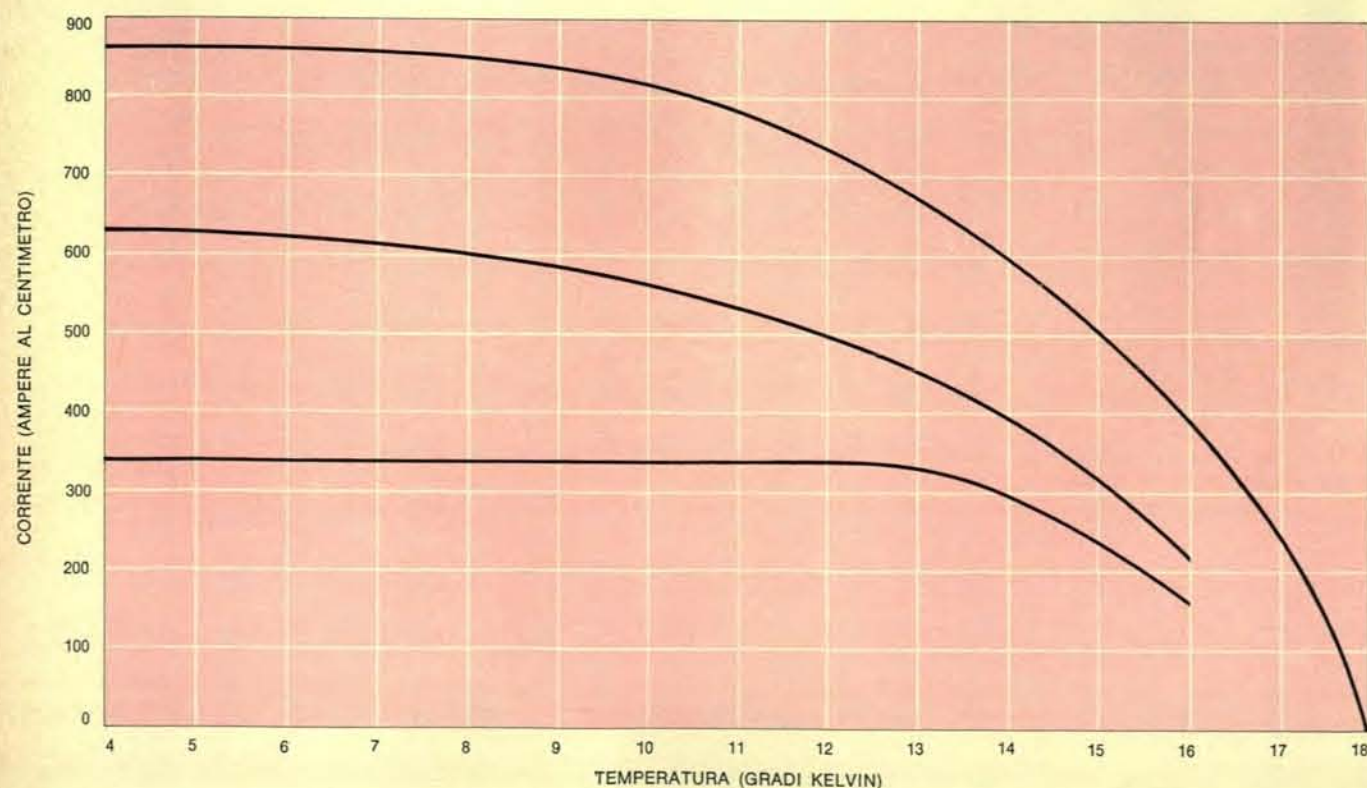
Bisogna tuttavia ricordare che lo obiettivo che ci si propone di raggiungere con i nuovi tipi di reti di trasmissione non è solamente quello di ridurre le perdite di esercizio, ma piuttosto quello di ridurre gli investimenti di capitale. In altre parole, è chiaramente preferibile produrre all'origine un chilowattora in più, al costo di mezzo centesimo che non spendere un centesimo per refrigerare la linea allo scopo di non perdere lo stesso chilowattora. Soltanto per linee aeree ad alta capacità e operanti a pieno carico (e cioè con il massimo delle perdite) le perdite capitalizzate diventano paragonabili agli investimenti di capitale. Salvo questa eccezione, in ogni ragionevole sistema, le perdite capitalizzate rappresentano sempre una piccola frazione del costo di ogni linea di trasmissione, attuale o potenziale, aerea o sotterranea.

I sistemi di trasmissione criogenici, già allo stato attuale della tecnica, presentano un grosso vantaggio rispetto ad altri sistemi sotterranei: la capacità del sistema può essere aumentata in

Schema della distribuzione dei flussoidi in una striscia di superconduttore di tipo II attraversato dalla corrente. I flussoidi rappresentano campi magnetici sotto forma di vortici quantizzati. Essi penetrano all'interno del conduttore in modo tale che la corrente può scorrere attraverso la maggior parte del materiale, piuttosto che sulla superficie, come nei superconduttori di tipo I. La distribuzione mostrata in figura è tipica del caso in cui l'intensità della corrente è stata incrementata a partire da un valore nullo.

La potenza perduta in un superconduttore di tipo II composto di niobio cresce approssimativamente con la terza potenza della corrente, per piccole correnti, e con la quarta potenza, per correnti d'intensità maggiore. Il diagramma mostra le perdite relative al caso di una corrente elettrica alternata a 50 cicli al secondo alla temperatura dell'elio liquido.

L'immobilizzazione dei flussoidi riduce le perdite di potenza aumentando l'interazione fra metallo superconduttore e flussoidi. L'immobilizzazione è realizzata con una struttura cilindrica (*a sinistra*) costituita da sottili strati concentrici di un composto superconduttore di niobio e stagno alternati con strati di materiale non superconduttore. La superficie di separazione tra superconduttore e non superconduttore ha la funzione di immobilizzare i flussoidi, come illustrato schematicamente nel disegno ingrandito a destra. La riduzione delle perdite di potenza cosí ottenute permette piú elevate temperature di utilizzazione.

un tempo successivo senza modificare la linea e senza installarne una nuova. Poiché l'investimento di capitale relativo alla refrigerazione ammonta a circa la metà del costo totale della linea, si può installare inizialmente una linea a ridotta capacità, e quando questa capacità dovesse essere aumentata, si potrebbe raggiungere lo scopo aumentando la refrigerazione. Per di piú, si potrebbe anche lasciar crescere un po' la temperatura della linea durante i periodi di massimo carico, accettando cosí maggiori perdite per brevi periodi. Sarebbe solo necessario che la capacità di refrigerazione fosse uguale a quella richiesta dai carichi medi. Infine, se il sistema fosse raffreddato con un fluido poco costoso e inerte, come per esempio azoto liquido, si potrebbero affrontare sovraccarichi di emergenza, se di breve durata, lasciando che parte del fluido frigorifero vaporizzi direttamente nell'atmosfera, sottraendo cosí il suo calore latente di vaporizzazione. Passata l'emergenza, l'azoto potrebbe essere reintegrato. Parecchie società industriali, sovvenzionate in parte dall'Edison Electric Institute, stanno progettando cavi raffreddati criogenicamente e ci si aspetta che un cavo ad azoto liquido possa entrare in esercizio verso la metà degli anni '70.

Dipendenza della corrente dalla temperatura in un cilindro stratificato di niobio e stagno. La corrente critica è mostrata dalla curva in alto; le altre curve indicano rispettivamente la corrente per una perdita di 10^{-5} e di 10^{-4} watt al centimetro quadrato.

Senza dubbio il cavo superconduttore offre la piú allettante risposta alle necessità di trasmissione di energia elettrica che si presenteranno in un prossimo futuro. Certamente la sua realizzazione richiederà studi complessi e notevoli sforzi. L'attrattiva primaria di una linea di trasmissione a superconduttore non è tanto la sua capacità potenziale a convogliare corrente con basse perdite, quanto la sua capacità di trasportare un'enorme quantità di corrente senza usare tensioni molto alte. Finora l'unica strada per aumentare la capacità di carico di una linea è stata quella di aumentare la tensione.

Tratterò dapprima i sistemi a corrente alternata, il che non significa però che linee a superconduttori in corrente continua non possano un giorno essere usate. La prima rete a superconduttori verrà certamente progettata per aree metropolitane, nelle quali non sono coinvolte grandi distanze. Come abbiamo visto, reti a corrente continua sono economiche solo quando interessano grandi distanze.

Nel 1911 il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes scoprí che certi metalli, come l'alluminio, lo stagno, il piombo e il mercurio, perdono tutta la loro resistenza al flusso della corrente elettrica quando sono raffreddati nelle vicinanze dello zero assoluto. Sfortunatamente questi metalli, ora noti come superconduttori di tipo I, possono trasportare solamente correnti molto piccole, senza perdere la loro superconduttività. Agli inizi degli anni '50 la situazione cambiò radicalmente con la scoperta di una nuova classe di metalli, ora noti come superconduttori di tipo II, che rimangono superconduttori anche quando convogliano sensibili quantità di corrente (si veda l'articolo *La struttura magnetica dei superconduttori* di Uwe Essmann e Hermann Traüble, in « Le Scienze », n. 34, giugno 1971).

I materiali di tipo I non sono in grado di trasportare una corrente maggiore perché un conduttore di questo tipo allo stato di superconduttore non permette al campo magnetico di penetrare in esso. (Una legge fondamentale della teoria dell'elettromagnetismo stabilisce che una corrente non può circolare se non è accompagnata da un campo magnetico variante nello spazio.) I materiali di tipo II permettono, invece, ai campi magnetici di penetrare all'interno del conduttore sotto forma di vortici quantizzati, o flussoidi, e cosí la corrente può fluire attraverso il materiale superconduttore (*si veda la figura in alto a pagina 71*).

I flussoidi presentano due tipi di interazione di particolare importanza. In primo luogo essi interagiscono con la corrente e sono disposti in una direzione perpendicolare sia alla direzione del flusso di corrente sia alla direzione del campo magnetico. Perciò i flussoidi creati dal campo magnetico di una corrente sono indirizzati dalla superficie verso l'interno del conduttore. In secondo luogo i movimenti dei flussoidi sono contrastati dalle imperfezioni presenti nel metallo superconduttore. Queste due interazioni dei flussoidi permettono il passaggio di energia dalla corrente in movimento al metallo stazionario, per cui si crea una sensibile dissipazione di potenza.

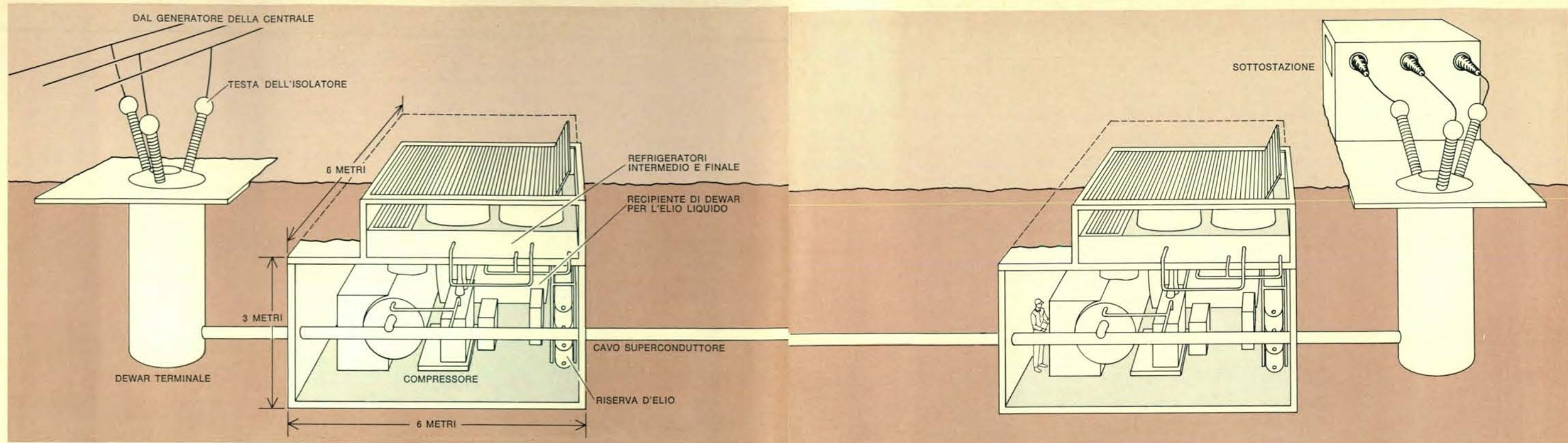
Questa perdita è ragionevolmente piccola in un superconduttore di tipo II che trasporta corrente continua, poiché una distribuzione fissa di flussoidi è compatibile con una corrente continua, e l'unica interazione con il superconduttore è quella prodotta da un piccolo slittamento dei flussoidi al di fuori della distribuzione fissa. Con correnti alternate, invece, i flussoidi sono continuamente in movimento per l'alternanza stessa della corrente. Il movimento causa una dissipazione di potenza che cresce linearmente con la frequenza; peggio ancora, la perdita di potenza spesso cresce con la terza o quarta potenza della corrente trasportata.

Le perdite sono cosí forti che originalmente si pensò che i superconduttori di tipo II non fossero adatti a trasportare correnti alternate. Una recente ricerca ha però mostrato in quale modo essi possano essere usati. In materiali di tipo II i flussoidi si formano solamente al di sopra di un certo campo magnetico, chiamato campo critico inferiore. Al di sotto di questo valore critico il materiale si comporta come un superconduttore di tipo I nel quale la corrente è trasportata soltanto in un piccolo strato superficiale. In questo strato non ci sono perdite sia in corrente alternata sia in corrente continua. Nella maggior parte dei materiali la quantità di corrente trasportata è troppo piccola per poter rispondere alle esigenze di una normale rete di trasmissione.

Un solo superconduttore di tipo II ha tuttavia un campo critico inferiore il cui valore è piuttosto alto. Questo materiale è il niobio, nel quale la prima formazione di flussoidi avviene quando il campo magnetico raggiunge 1400 oersted a 4,1 gradi Kelvin (punto di ebollizione dell'elio liquido). Questo valore permette a un conduttore cilindrico di niobio di trasportare una intensità media di 790 ampere in corrente alternata per ogni centimetro della sua circonferenza, senza superare il campo critico inferiore. (L'intensità media di una corrente alternata, tecnicamente definita dal rapporto con la radice quadrata di 2, ammonta a circa il 70 % della intensità di picco). Con una intensità di corrente di 790 ampere al centimetro risulta certamente possibile progettare reti di trasmissione a superconduttori.

Per approfittare dei benefici offerti dalla geometria cilindrica in un sistema trifase è necessario circondare ciascuno dei tre conduttori con un conduttore coassiale di ritorno, anch'esso superconduttore (*si veda la figura a pagina 69*). Il campo magnetico relativo a ciascun conduttore è quindi confinato fra il conduttore interno e quello esterno; pertanto non può avvenire alcuna interazione tra il campo magnetico di una linea e la corrente di un'altra, e neppure il campo magnetico può interagire con le pareti del contenitore o del condotto. A tale scopo sono state proposte e studiate geometrie triassiali e quadriassiali. Linee che utilizzano il niobio superconduttore sono attualmente allo studio negli USA da parte della Linde Division della Union Carbide e nei Central Electricity Research Laboratories in Inghilterra.

Il dielettrico usato per isolare una linea a superconduttore sarà probabilmente il vuoto o l'elio liquido. La maggior parte dei dielettrici solidi originerebbe infatti perdite proibitive, nonostante che il polietilene o il polipropilene potrebbero dimostrarsi adatti in sistemi a tensioni moderate. Con tutta probabilità l'elio finirà per essere la scelta definitiva, poiché esso può anche servire come fluido refrigerante.

Un problema critico per una linea di trasmissione criogenica è sicuramente quello di dotarlo di un sistema di refrigerazione assolutamente sicuro. Finora ben pochi fluidi refrigeranti, ammesso che ve ne sia stato qualcuno, hanno operato senza sostanziale assistenza per anni. Le dispersioni di calore a 4,2 gradi Kelvin sono dell'ordine di 75-150 watt al chilometro, ovvero circa uguali al consumo di un comune frigorifero domestico. Ma men-

Sistema d'installazione per un cavo superconduttore sotterraneo per il trasporto di corrente alternata attraverso un'area densamente popolata della Union Carbide. L'energia elettrica è introdotta nel sistema a sinistra per mezzo di una linea aerea che la preleva dal generatore della centrale. La linea attraversa quindi un impianto di refrigerazione che mantiene la bassa temperatura necessaria per la superconduttività. L'impianto è visto in sezione. Altri impianti di refrigerazione sono indispensabili circa ogni 10 chilometri; a destra un secondo impianto a una ventina di chilometri dal primo. Questo sistema superconduttore è stato progettato per una distanza da 10 a 40 chilometri. In fine esso cede l'energia alla sottostazione preposta alla distribuzione.

tre un frigorifero casalingo può « pompare » 300 watt di calore con un consumo di circa 357 watt di energia elettrica, un impianto refrigeratore criogenico può arrivare a consumare anche 50 000 watt (50 chilowatt) per chilometro di linea. La ragione di ciò è che gli impianti frigoriferi a bassa temperatura sono termodinamicamente molto poco efficienti.

Sebbene il consumo di 50 chilowatt al chilometro possa sembrare un valore piuttosto alto, esso costituisce solo una piccola frazione della potenza totale trasmessa. La frequenza spaziale fra gli impianti frigoriferi può variare da 10 a 100 chilometri, dipendendo essa, almeno in parte, dal fatto che venga usato come refrigerante elio liquido, gassoso o allo stato supercritico. Un modo per garantire la sicurezza consisterà nel prevedere compressori di riserva, i quali potrebbero servire anche durante i periodi iniziali di raffreddamento. Un altro fattore di sicurezza potrebbe essere quello di progettare i compressori surdimensionati, in modo che unità adiacenti potrebbero, in caso di emergenza, assorbire il carico dell'unità vicina.

In esperimenti fatti dalla Linde e da altri con conduttori di niobio è emerso un risultato clamoroso e apparentemente generale. Sebbene il niobio venga mantenuto al di sotto del campo critico inferiore, le perdite non sono nulle, come ci si potrebbe aspettare, ma crescono approssimativamente con la terza potenza della corrente (*si veda la figura in basso a pagina 71*). L'ammontare delle perdite nel niobio dipende strettamente dalla qualità della superficie del conduttore. Apparentemente sembra che ogni rugosità, comparabile in dimensioni a quelle dei flussoidi, faccia sí che il campo magnetico locale cresca a un valore molto piú grande di quello dovuto. I flussoidi cosí formatisi per le imperfezioni superficiali, generano perdite.

Sebbene le perdite in corrente alternata nel niobio non siano del tutto nulle, esse sono sufficientemente basse da essere accettabili in un sistema di trasmissione. Un progetto tipico prevede conduttori coassiali con un conduttore interno di 7 centimetri di diametro, capace di trasportare 4700 milioni di voltampere a 230 000 volt. (Ciò rappresenta qualcosa come 8 volte la capacità di una tipica linea a 350 000 volt, menzionata precedentemente). Per tale linea le perdite per conduttore e per chilometro, col sistema mantenuto a 4,2 gradi Kelvin, ammonterebbero a circa 40 watt, mentre le perdite di calore verso il cavo isolato aggiungerebbero altri 100 watt.

Dato che non ci si può evidentemente aspettare di annullare completamente le perdite in una linea a corrente alternata con conduttori al niobio, si potrebbero prendere in considerazione altri materiali superconduttori. Se si potesse usare un materiale che rimanesse superconduttore a temperature piú alte, si potrebbero vantaggiosamente barattare perdite maggiori con risparmi nei costi di refrigerazione. L'esercizio a temperature piú alte aumenterebbe anche la stabilità termica.

Alla Gulf General Atomic abbiamo studiato la possibilità di usare un composto di niobio e stagno (Nb_3Sn), che rimane superconduttore anche a una temperatura circa doppia di quella del niobio. Tuttavia il campo critico inferiore dell'Nb_3Sn è molto basso, il che significa che tale composto può essere usato in linee di trasmissione solo nel regime di tipo II, ovvero con flussoidi. A sua volta ciò sarà possibile solo se le perdite in corrente alternata, dovute ai movimenti dei flussoidi, sono basse.

È stato dimostrato che le perdite in corrente alternata possono essere ridotte aumentando l'interazione dei metalli superconduttori con i flussoidi. Questa interazione, che si può definire una immobilizzazione dei flussoidi, agisce mediante varie inomogeneità nel metallo, che determinano punti stericamente favorevoli per i flussoidi. Al crescere della densità dei punti favorevoli, le perdite di corrente diminuiscono.

Abbiamo fatto esperimenti con strutture cilindriche consistenti in sottili strati concentrici di Nb_3Sn alternati con strati di materiale non superconduttore, ottenuti mediante deposizione di vapori sotto vuoto (*si veda la figura in alto a pagina 72*). La superficie di separazione fra il superconduttore e il materiale non superconduttore ha la funzione di immobilizzare i flussoidi. Le correnti trasportate dai nostri campioni diminuiscono solo di poco entro un campo di temperature compreso tra 4,2 gradi Kelvin e 15 gradi Kelvin, confermando cosí l'opinione che l'Nb_3Sn può essere adatto a temperature sensibilmente piú alte che non quelle del niobio puro (*si veda la figura in basso a pagina 72*). Le perdite e la capacità di convogliare corrente di strutture composite di Nb_3Sn fra 10 e 12 gradi Kelvin sono dello stesso ordine di grandezza di quelle del niobio a 4,2 gradi Kelvin; tale differenza dovrebbe risultare in un risparmio nell'investimento di capitale relativo al sistema di refrigerazione di un fattore di piú di 3 volte.

Nonostante tutte le argomentazioni illustrate precedentemente si può dire che il problema di progettare una linea di trasmissione sotterranea ad alta capacità per gli anni compresi fra il 1980 e il 1990 è ancora in discussione. Chiaramente la linea dovrà essere refrigerata forzatamente, ma allo stato attuale delle cose è piuttosto incerto predire quale temperatura possa dimostrarsi la piú economica. È stato mostrato che la linea dovrebbe essere basata su superconduttori. I risultati dei laboratori di fisica sono stati sinora favorevoli, e progettazioni esecutive preliminari non hanno finora mostrato ostacoli insormontabili, ma parecchi dettagli devono ancora essere messi a punto. Stime economiche si sono pure dimostrate favorevoli. Piú o meno lo stesso, però, può essere detto per altri avanzati sistemi di trasmissione. Può essere che il sistema che verrà adottato in futuro derivi da quello che sarà studiato con maggiore impegno.

I ricercatori particolarmente lungimiranti, o forse i sognatori piú avventurosi, guardano ben oltre la necessità di trasportare poche migliaia di megawatt entro un'area densamente popolata, e piuttosto al giorno in cui l'intera capacità di generazione di energia consisterà in un insieme di enormi centrali elettriche nucleari situate sulle coste (e magari al largo di esse) o, in alternativa, in mezzo ai continenti, con linee di trasmissione sotterranee a grandissima capacità, che portano energia a tutti i consumatori di tutto un paese. In virtú della loro alta capacità di corrente, probabilmente i superconduttori saranno i candidati prescelti.

Una proposta sviluppata dettagliatamente qualche tempo fa da Richard L. Garwin e Juri Matisoo della IBM contempla una linea a corrente continua lunga 1200 chilometri, basata su superconduttori, e della capacità di 100 000 megawatt. Tale linea, sebbene sia ancora molto lontana nel futuro, sarebbe la naturale evoluzione delle piú piccole linee a superconduttori che attualmente vengono studiate. Essa potrebbe portare a ristrutturare completamente l'insieme delle centrali elettriche e delle linee di trasmissione di un intero paese. Un cosí grande salto qualitativo della capacità di carico non è possibile per gli altri sistemi avanzati di trasmissione dell'energia elettrica ora allo studio.

Un'antica rivoluzione agricola

Si riteneva che l'uomo avesse domesticato piante e animali per la prima volta nel Medio Oriente. Scavi compiuti nel Sud-est asiatico fanno ora pensare che la rivoluzione agricola iniziò circa 5000 anni prima

di Wilhelm G. Solheim II

L'agricoltura, si sa, è stata inventata almeno due volte: nel vecchio mondo, dove ebbero inizio la coltivazione delle piante e l'allevamento degli animali, e del tutto indipendentemente, alcuni millenni piú tardi, nel nuovo mondo. Ora sono state scoperte le prove di una terza rivoluzione agricola. Finora si pensava che essa fosse avvenuta per la prima volta 10 000 anni or sono tra le nascenti società neolitiche del Medio Oriente, mentre ora sembra abbia avuto inizio indipendentemente nel Sud-est asiatico. Questa antichissima rivoluzione agricola ha riguardato piante e animali per la maggior parte sconosciuti nel Medio Oriente e può aver avuto inizio anche 5000 anni prima.

Il fatto che nel periodo compreso tra il 13 000 e il 4000 a.C., alcune delle culture tecnologicamente piú avanzate del mondo siano fiorite non nel Medio Oriente o nel vicino Mediterraneo ma nelle regioni settentrionali del continente asiatico sud-orientale è difficilmente accettabile. Ciononostante recenti scavi compiuti in Tailandia hanno convinto i miei colleghi e me che in un qualche posto, tra le montagne ricoperte di foreste della regione, i primi sforzi, i primi tentativi di sfruttare le piante e gli animali selvatici hanno aperto la via prima all'orticoltura e poi all'agricoltura e all'allevamento degli animali in senso lato.

Per quanto riguarda la preistoria, il Sud-est asiatico continentale e insulare costituisce nel suo insieme la piú grande regione sconosciuta del mondo. Solo nell'ultimo decennio si è visto che questa zona è molto interessante dal punto di vista della ricerca archeologica. Personalmente ho iniziato le ricerche in questa regione cominciando nel 1949 dalle Filippine e poi proseguendo sia in altre isole sia sul continente. La necessità di compiere un lavoro archeologico di recupero prima di iniziare lavori di ricostruzione sistematica nel basso bacino del Mekong divenne evidente dopo gli scavi di due siti nella Tailandia settentrionale eseguiti dai miei colleghi e da me nel 1965-1966. Il primo sito, un tumulo preistorico chiamato Non Nok Tha, è vicino alla zona bagnata un tempo dalle acque della riserva di Nam Phong. Il nostro lavoro in questa zona, patrocinato congiuntamente dal Dipartimento governativo delle belle arti di Thai, dall'Università di Otago nella Nuova Zelanda e dal mio Dipartimento dell'Università delle Hawaii, cominciò durante la stagione secca 1965-1966 con l'appoggio della National Science Foundation. Contemporaneamente il mio dipartimento finanziò un secondo scavo in un sito promettente nell'angolo nord-occidentale della Tailandia: la Caverna dello spirito; il suo scopritore e scavatore, Chester F. Gorman, era uno studente di ingegneria mineraria all'Università delle Hawaii.

Il tumulo di Non Nok Tha era coltivato collettivamente da alcuni contadini di un piccolo villaggio vicino che lo avevano coperto quasi interamente di piantagioni di banane, di peperoni piccanti e di arbusti di gelso. Sul tumulo vi erano anche due zone spoglie dove era stato battuto il riso raccolto nelle risaie circostanti. Scavando al limite di una piantagione di gelsi trovammo che gli strati superiori del tumulo contenevano utensili di ferro e numerosi resti di individui cremati prima della sepoltura. Sotto questi strati vi erano tombe precedenti i cui occupanti non erano stati cremati; le sepolture includevano varie suppellettili tombali. Tra queste vi erano stampi di pietra per forgiare le lame di bronzo delle asce, alcune asce, altri oggetti di bronzo e vari utensili di pietra levigata. Le tombe contenevano anche delle terraglie ben fatte ma generalmente non decorate. Ai livelli piú bassi del sito trovammo ancora utensili di pietra levigata e alcuni esemplari di terraglie decorate, ma nessun oggetto di bronzo.

Si trattò di scoperte molto significative. Innanzitutto, mai prima di allora si era trovato un solo sito nel Sud-est asiatico, che contenesse le prove dell'esistenza di un considerevole periodo di tempo in cui il bronzo era conosciuto ma il ferro no. In secondo luogo tra le terraglie rinvenute nei livelli piú bassi vi erano due vasi decorati con un motivo che avevo visto per la prima volta nelle Filippine e successivamente nelle terraglie provenienti dagli scavi fatti altrove nel Sud-est asiatico.

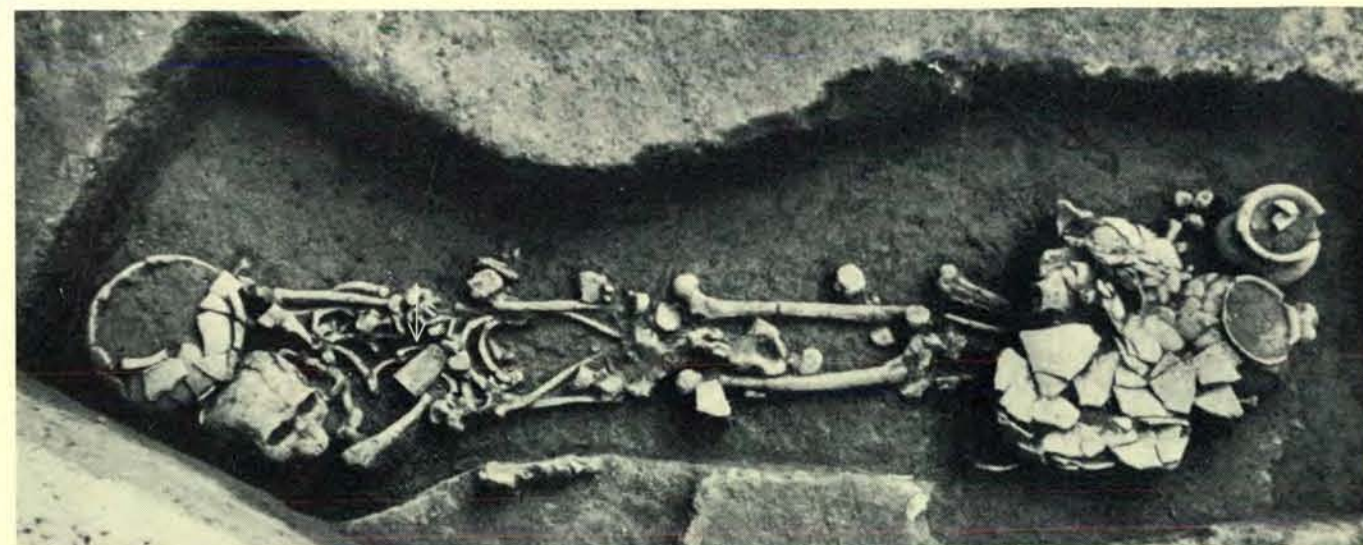
Non Nok Tha si rivelò cosí ricco di tombe che il lavoro proseguí molto piú lentamente di quanto avevamo previsto. Alla fine mettemmo insieme piú di 100 pezzi di vasellame per il Museo nazionale di Thai, inviammo campioni per l'analisi del carbonio-14 e imballammo numerosi altri reperti destinati alle ricerche di laboratorio da compiere presso l'Università delle Hawaii. Lasciammo intoccate parecchie delle tombe piú profonde con l'intenzione di riservarle a scavi successivi. Eravamo convinti che i livelli piú bassi del tumulo fossero molto antichi, e risalissero forse fino al 1000 a.C., ma non ne potevamo essere certi finché non erano noti i risultati delle analisi del carbonio-14.

Quando alle Hawaii sballammo, pulimmo ed esaminammo i campioni, ci trovammo ancora una volta di fronte a scoperte impreviste. Per esempio, tra i cocci provenienti dai livelli piú bassi ne trovammo alcuni che portavano l'impronta di chicchi di cereali. Pareva che il cereale fosse riso e ne mandammo una serie di campioni a uno specialista, Hitoshi Kihara dell'Istituto di ricerche biologiche Kihara di Giappone. Kihara concluse che il cereale era l'*Oryza sativa*, specie comune di riso coltivato attualmente in tutta l'Asia.

In molte tombe di Non Nok Tha trovammo anche ossa di animali. Davano l'impressione che si trattasse di parti di ossa di grandi animali tagliate e messe nelle tombe. Charles Higham dell'Università di Otago si offrí di identificare le ossa. Le trovò identiche alle ossa del *Bos indicus*, il comune zebú indiano.

Finalmente ricevemmo i risultati relativi al carbonio-14. Questi rivelarono che il tumulo era molto piú antico di quanto avevamo supposto. I livelli piú bassi che avevamo scavato erano stati depositati prima del 3000 a.C., alcuni forse anche anteriormente al 4000 a.C. Nessuno strato superiore, però, era piú antico di 1000 anni.

All'inizio del 1968 Donn T. Bayard dell'Università di Otago poté scavare in un'altra area di Non Nok Tha. Aprí diverse tombe profonde; una conteneva uno scheletro umano molto ben conservato e sul petto dello scheletro c'era un utensile incavato fatto di rame. Poiché la sepoltura del corpo si deve far risalire al quarto millennio a.C., questo oggetto di rame è il piú antico utensile incavato noto in tutto il mondo.

Riassumendo, i ritrovamenti a Non Nok Tha hanno riservato parecchie sorprese. Hanno dimostrato che il riso era un cereale conosciuto e che lo

Nel 1968, a Non Nok Tha, un sito della Tailandia settentrionale particolarmente ricco dal punto di vista archeologico, Donn T. Bayard, dell'Università di Otago in Nuova Zelanda, portò alla luce una tomba del quarto millennio a.C. Oltre a uno scheletro, la tomba conteneva un utensile incavato fatto di rame (*freccia*). Il fatto che il rame contenga tracce di arsenico e di fosforo fa pensare che, anche nel caso non si tratti di una fusione, il metallo sia stato riscaldato per prepararlo alla martellatura a freddo.

Ossa di animali (*a destra, in primo piano*) tipiche di molti ritrovamenti ossei, di cui alcune vecchie piú di 5000 anni, trovate nelle sepolture di Non Nok Tha. Probabilmente si tratta di ossa del comune zebú indiano, *Bos indicus*.

zebú era comune nel continente asiatico sud-orientale forse già nel quinto millennio a.C. La metallurgia del bronzo aveva prosperato nella regione per un considerevole intervallo di tempo prima della comparsa del ferro, e un unico esemplare di utensile di rame era apparso in scena ancora prima. Nessuna di queste conquiste ha avuto luogo del tutto isolatamente: alcuni dei primi vasi trovati in questo angolo del continente portano disegni che sono stati trovati altrove nel Sud-est asiatico sia continentale che insulare. Sorprese ancora più grosse, però, erano in serbo per noi nella Caverna dello spirito.

Il sito di Gorman giace in alto sul fianco di una rupe calcarea che sovrasta un piccolo corso d'acqua non lontano dal confine tra la Tailandia e la Birmania. Come scoprí Gorman, la caverna era stata occupata l'ultima volta nel 5600 a.C. I livelli al di sotto di quello superficiale coprono piú di 4000 anni e i primi strati si sono formati circa nel 10 000 a.C. I manufatti trovati in tutti questi livelli di insediamento (eccettuati quelli dei livelli relativi agli ultimi 1200 anni circa) erano pressappoco gli stessi: semplici utensili di pietra caratteristici di una cultura di cacciatori e di raccoglitori del Sud-est asiatico; questa cultura è detta hoabinhiana perché le caverne in cui questi semplici manufatti sono stati portati alla luce per la prima volta, nel corso degli anni venti, si trovano nelle montagne vicine alla città di Hoa Binh nel Vietnam del nord. Dopo la prima scoperta sono stati trovati molti altri siti contenenti manufatti hoabinhiani nei territori montuosi della parte settentrionale del Sud-est asiatico, quasi sempre in piccole caverne non lontane da corsi d'acqua. A prima vista la caverna di Gorman sembrava un altro ritrovamento hoabinhiano, notevole solo per essere piú a ovest di ogni altra scoperta precedente.

Presto, però, due ritrovamenti dimostrarono l'importanza della Caverna dello spirito. Il primo fu il frutto della ricerca accurata svolta da Gorman per trovare resti vegetali. Setacciando tutto il terreno rimosso dagli scavi di prova, Gorman ricuperò i frammenti di piante appartenenti a 10 generi diversi tra le quali pepe, noce, mandorlo, noce da olio e noce di betel. Ancor piú significativa la presenza di una specie di cetriolo, di zucche, di castagne cinesi e di certi legumi: il pisello (*Pisum*), il fagiolo e la fava (*Phaseolus* e *Vicia*) e probabilmente anche la soia (*Glycine*). Alcuni di questi resti vegetali erano presenti in tutti i livelli del sito.

Pare probabile che parecchie piante fossero coltivate dagli abitanti della Caverna dello spirito. La quantità relativamente piccola di campioni, che Gorman recuperò nel 1966, non rende però possibile trarre una conclusione netta e precisa su questo punto cruciale. L'anno scorso Gorman compí altro lavoro alla Caverna dello spirito e recuperò altri campioni che ora sono in corso di esame da parte di Douglas Yen del Bernice P. Bishop Museum a Honolulu e quindi può darsi che il problema sia presto risolto.

Tra i siti primitivi piú importanti del Sud-est asiatico c'è Hoa Binh, nel Nord Vietnam, i cui resti appartenenti a una cultura di cacciatori e di raccoglitori furono trovati negli anni trenta, e un altro sito hoabinhiano, la Caverna dello spirito, in Tailandia, dove è probabile siano state trovate le prove della prima agricoltura mai esistita. Le terraglie della Caverna dello spirito, tra le piú antiche del mondo, assomigliano al vasellame di epoca piú recente trovato a Formosa. Un altro sito della Tailandia, Non Nok Tha, non solo conteneva un utensile primitivo di metallo unico nel suo genere, ma anche terraglie con disegni simili a quelli trovati sulle terraglie malesi e filippine. Il basso livello dei mari faceva sí che in quel periodo fosse molto estesa la superficie delle terre emerse, corrispondente, secondo una valutazione, alla parte in colore della cartina.

Supponiamo, per amore di discussione, che il risultato dell'analisi di Yen sia negativo e che le piante portate alla Caverna dello spirito siano semplicemente specie selvatiche raccolte nelle campagne circostanti per integrare la dieta dei cacciatori. Che cosa dovremmo concludere in questo caso? Questa scoperta costituirebbe la prova che nel Sud-est asiatico si era a uno stadio molto avanzato nello sfruttamento delle piante selvatiche, stadio che, a mio parere, è contemporaneo a qualsiasi altro stadio equivalente noto nel Medio Oriente. D'altra parte, che cosa succederebbe se i risultati delle analisi di Yen fossero positivi? Si avrebbe la prova che gli abitanti della Caverna dello spirito si occupavano di agricoltura almeno con 2000 anni di anticipo rispetto alla prima coltivazione delle piante avvenuta nel Medio Oriente.

La successiva grande scoperta di Gorman fu la prova che nel 6800 a.C. influssi chiaramente non hoabinhiani avevano raggiunto la Caverna dello spirito. Questo fatto era dimostrato dalla presenza, tra i semplici utensili hoabinhiani, di manufatti diversi e caratteristici tra cui asce di pietra rettangolari con superfici parzialmente levigate e coltelli ottenuti levigando entrambi i lati di un pezzo piatto di ardesia in modo da formare uno spigolo tagliente a forma di cuneo. Utensili di questo tipo risalenti a un periodo cosí antico non sono noti in nessun altro luogo del continente asiatico sud-orientale.

Ancor piú importante fu la presenza negli strati superiori di frammenti di terraglie con diverse decorazioni. La maggior parte dei cocci presentava delle scanalature prodotte probabilmente prima che il vaso fosse cotto colpendo l'argilla molle con una spatola rivestita di corda. Altri cocci recano tracce di levigatura, mentre altri ancora sono stati decorati incidendo l'argilla molle con un utensile simile a un pettine; alcuni inoltre sono ricoperti da una specie di vernice resinosa. Se si eccettuano alcuni esemplari molto primitivi di terraglie portati alla luce in Giappone, questi frammenti della Caverna dello spirito sono i piú vecchi del mondo. Inoltre, la varietà delle decorazioni e delle rifiniture che essi presentano testimoniano dell'esistenza di una raffinata tradizione in fatto di arte vasaia e con un passato importante.

Inoltre lo scorso anno nel raccogliere altro materiale vegetale Gorman rinvenne esemplari di un nuovo tipo di manufatti da aggiungere all'inventario della Caverna dello spirito. Si tratta di piccole palline di argilla cotta. Scavando a Non Nok Tha avevamo trovato palline simili, ma piú recenti. I nostri operai avevano suggerito che si trattasse di proiettili da usare con un « arco a palle », un'arma che i bambini della Tailandia settentrionale usano ancora per uccidere gli uccelli. Lo strumento è simile a un comune arco eccetto che per una tasca per la pallottola simile a una fionda attaccata alla corda dell'arco.

È caratteristico dell'archeologia asiatica sud-orientale il fatto che i proiettili appuntiti di pietra, i manufatti piú abbondanti nel resto del mondo, si trovino raramente in questa regione. Il motivo è dovuto presumibilmente al fatto che i primi cacciatori della zona costruivano i proiettili in legno come fanno ancora gli asiatici sud-orientali, che cacciano con l'arco e con le frecce; gli oggetti fatti di legno naturalmente marciscono presto e non lasciano traccia nella storia archeologica. Se le palline di argilla della Caverna dello spirito fossero veramente fatte per gli archi, allora queste armi e probabilmente archi e frecce di tipo convenzionale potrebbero essere state usate in quei luoghi 9000 o piú anni fa.

Prendendo in considerazione sia l'arco delle datazioni col carbonio-14 sia il ricco inventario di resti portati alla luce nella Caverna dello spirito e a Non Nok Tha, è evidente che è necessario rivedere radicalmente le nostre concezioni sulla preistoria del Sud-est asiatico. Lo schema teorico che segue, relativo a una nuova preistoria regionale, è basato appunto su questa revisione. La mia ricostruzione è largamente ipotetica; bisogna dimostrarla con ulteriori scavi sia nell'area continentale sia nell'area insulare. Gran parte di questa teoria è basata sui ritrovamenti fatti nei due siti tailandesi, ma vi ho incluso ulteriori dati presi dal lavoro mio e di altri compiuto nella regione. Poiché lo schema contiene termini non usuali, passerò prima di tutto in rassegna la terminologia preistorica convenzionale

I frammenti di terraglie trovati nella Caverna dello spirito, alcuni vecchi di 9000 anni, sono decorati con elaborate incisioni (*a*, *b*), il che fa pensare che l'arte vasaia si fosse sviluppata ancor prima in qualche altra parte del Sud-est asiatico. I disegni assomigliano a quelli di terraglie risalenti a piú di 4000 anni fa (*c*, *d*) trovate a Formosa.

Sulla base di scavi recenti è stato elaborato un nuovo schema relativo alla preistoria del Sud-est asiatico. Le tradizionali suddivisioni in Età della pietra e dei metalli, valide per l'Europa ma non applicabili al Sud-est asiatico sono a sinistra. Oltre a queste, vi sono le cinque nuove suddivisioni relative al Sud-est asiatico che vanno dal tempo preistorico fino al tempo storico. I nomi dei periodi piú antichi si riferiscono al tipo di materiale maggiormente usato nella fabbricazione di utensili: Litico si riferisce agli utensili di pietra; Lignico, agli utensili di legno. I nomi dei periodi successivi indicano invece le tendenze principali. Le culture locali si formarono nella regione durante il Periodo cristallitico; nel Periodo estensionistico molte popolazioni si allontanarono dalle montagne; il Periodo degli imperi in lotta vide il sorgere di stati dopo l'inizio dell'Era cristiana. Lo schema mostra anche le relazioni esistenti fra i periodi, i siti particolari e i progressi fondamentali.

in modo da dare a questi termini nuovi una giusta prospettiva temporale.

Per piú di un secolo gli archeologi si sono riferiti a tre stadi dell'Età della pietra: il Paleolitico, il Mesolitico, e il Neolitico. I termini sono stati definiti inizialmente per renderli adatti alla preistoria dell'Europa, ma da allora sono stati applicati in maniera cosí vasta presumendo, spesso superficialmente, che le culture di tutto il mondo siano passate attraverso questi tre stadi. È estremamente evidente, invece, come in molte regioni i termini europei non rappresentino correttamente la sequenza degli eventi; ciò è particolarmente vero per quanto riguarda il Sud-est asiatico. Qui l'evoluzione delle culture è stata nettamente diversa da quella dell'Europa e del Medio Oriente. Suggerisco quindi di adottare nuovi termini per quanto riguarda il Sud-est asiatico.

Propongo per il primo periodo del Sud-est asiatico il termine di Litico, che si riferisce al primo impiego, da parte dell'uomo, di pietre scheggiate e sfaldate come utensili. Questo periodo, equivalente grosso modo al primo e al medio Paleolitico europeo, è, a mio parere, il solo dei tre stadi dell'Età della pietra comune a tutto il genere umano. Nel Sud-est asiatico la tecnica di scheggiare e sfaldare la pietra si è sviluppata lentamente e non ha mai raggiunto il livello di abilità estremamente raffinata riscontrato in molte altre parti del mondo. Una possibile ragione di questo ritardo apparente è proposta in seguito. In ogni caso ho arbitrariamente fissato la fine del Litico intorno al 40 000 a.C.

Per il periodo successivo propongo il nome di Lignico, dal latino *lignum*. Fa parte della mia ipotesi che durante questo periodo gli utensili fatti di legno – particolarmente quelli fatti di bambú – siano divenuti per le popolazioni del Sud-est asiatico piú importanti di quelli di pietra. Un tale cambiamento nella scelta dei materiali per la fabbricazione di utensili aiuterebbe a spiegare il lento progresso della preistoria della regione.

Poiché raramente il legno si conserva nel terreno, difficilmente si può pensare di scavare antichi utensili di legno che provino la validità della mia ipotesi. È possibile però esaminare gli utensili di pietra per individuare tracce di usura che facciano pensare alla lavorazione del legno. Gorman ha fatto questo genere di ricerche a proposito degli utensili hoabinhiani trovati nella Caverna dello spirito, e ne ha trovati diversi con il bordo usurato in modo tale che si può supporre siano stati impiegati per sagomare grandi pezzi di legno e bastoni di legno di piccolo diametro. Può essere significativo a questo proposito il fatto che il carbone trovato nel terreno della Caverna dello spirito contiene un'alta percentuale di bambú carbonizzato.

Ho arbitrariamente collocato il periodo in cui fiorirono gli utensili di legno tra il 40 000 a.C. e il 20 000 a.C. Riferendoci alle culture preistoriche del Sud-est asiatico generalmente note, questa datazione farebbe corrispondere il Periodo lignico al primo Hoabinhiano.

Per il terzo periodo, sempre per quanto riguarda il Sud-est asiatico, propongo il nome di Cristallitico. Il termine non ha nulla a che fare con le materie prime ma intende suggerire che durante questo intervallo di tempo cominciarono a prendere forma o a cristallizzarsi nella regione culture locali distinte. Prima della fine del periodo, circa attorno all'8000 a.C., credo che si siano sviluppati nel Sud-est asiatico molti elementi culturali che vi si trovano ancora oggi. In base ai siti preistorici noti, il Periodo cristallitico equivale al medio e al tardo Hoabinhiano.

A mio parere fu durante il Periodo cristallitico che le tecniche di sagomare utensili di pietra per molatura e levigatura si sviluppò per la prima volta. All'inizio questo metodo fu applicato soltanto all'orlo tagliente dell'utensile; successivamente fu esteso all'intera superficie. Gli utensili di pietra molati e levigati piuttosto che scheggiati e sfaldati sono tipici del Periodo neolitico dell'Età della pietra in Europa e nel Medio Oriente; appaiono per la prima volta circa nell'8 000 a.C. nel Medio Oriente. Credo che la stessa tecnologia si sia fatta strada nel Sud-est asiatico molto prima.

Il Periodo cristallitico è anche l'intervallo in cui ha avuto inizio la coltivazione delle piante. Secondo me il cosiddetto medio Hoabinhiano fu caratterizzato da una cultura o da varie culture che iniziarono i primi tentativi con molte specie diverse di piante selvatiche. A un certo punto, probabilmente intorno al 13 000 a.C. in qualche zona settentrionale del Sud-est asiatico, questi esperimenti culminarono nella coltivazione di alcune di queste piante con la conseguente comparsa dell'orticoltura come nuovo mezzo per procacciarsi il cibo.

Poiché questa progredí fino al Periodo cristallitico, finalmente giungiamo a contatto con alcune delle nostre nuove prove, ossia le cose trovate nei livelli piú bassi nella Caverna dello spirito. A mio parere fu nella tarda cultura hoabinhiana, quale è rappresentata in questi strati, che avvenne il passaggio dall'orticoltura alla coltivazione generalizzata delle piante, all'allevamento degli animali e l'invenzione delle terraglie. In parti diverse della regione sarebbero state scelte per la coltivazione piante diverse. Lo stesso vale probabilmente anche per gli animali: il maiale, il pollo e forse anche il cane. Tutti questi elementi diversi della tarda cultura hoabinhiana si diffusero e si accumularono man mano che il tempo passava. Pare che quando si sono formati gli strati piú bassi della Caverna dello spirito, circa nel 10 000 a.C., la gente di questo luogo possedesse elementi della tarda cultura hoabinhiana quali una conoscenza progredita dell'orticoltura e forse maiali domesticati. Non avevano terraglie, però, e non ne avrebbero avute finché un'intera gamma di vasellame di raffinata fattura arrivò alla Caverna dello spirito da qualche parte del Sud-est asiatico circa 3 millenni piú tardi.

Per il quarto periodo del Sud-est asiatico propongo il nome di Estensionistico. Il termine si riferisce alla tendenza principale che ha caratterizzato questo intervallo di tempo: l'allontanamento delle popolazioni dalle montagne dove avevano vissuto precedentemente. La tendenza estensionistica che cominciò circa verso l'8000 a.C. e terminò circa all'inizio dell'Era cristiana, condusse la gente di montagna non solo verso molti habitat ospitali del continente ma anche oltre; le popolazioni di montagna si spostarono per terra e per mare praticamente in tutte le direzioni. Sono convinto che le future ricerche dimostreranno come le culture locali, nettamente diverse dal tardo Hoabinhiano, si siano sviluppate all'inizio di questo periodo.

Attualmente l'unica scoperta relativa a queste nuove culture è costituita dal complesso degli elementi trovati negli strati superiori della Caverna dello spirito: asce rettangolari, coltelli di ardesia e raffinato vasellame con impronte di corda. Questo complesso, però, non può essere considerato come una cultura indipendente: non si possono separare questi elementi dalle loro associazioni col tardo Hoabinhiano. C'è da qualche altra parte un complesso analogo libero da una matrice hoabinhiana? Esso esiste nell'isola di Formosa (Taiwan). I suoi manufatti comprendono asce rettangolari, punte di ardesia levigate e terraglie con impronte di corda, alcune decorate con

incisioni di pettine, come il vasellame della Caverna dello spirito. Questo complesso di Formosa è stato chiamato dal suo scopritore, Kwang-chih Chang della Yale University, cultura *Corded-Ware*. Poco si sa del suo periodo eccetto che, nei due siti all'aperto dove è stata portata alla luce, la cultura cessò di esistere un po' prima del 2500 a.C. Considerando i mutamenti che contraddistinsero il Periodo estensionistico, è opportuno sottolineare due punti. Primo, Formosa è molto distante dalla Caverna dello spirito. Secondo a Formosa i resti della cultura *Corded-Ware* si trovano sistemati non in una convenzionale caverna hoabinhiana ma all'aperto.

Quali furono le conseguenze degli spostamenti di popolazione durante questo periodo? A mio parere i primi spostamenti non portarono la popolazione molto piú lontano dell'adiacente zona pedemontana. Anche questo spostamento portò però una variazione ambientale sufficiente a far diminuire l'importanza della caccia agli animali selvatici e della raccolta delle piante selvatiche e a rendere molto piú importante l'agricoltura. Il passaggio dalla dipendenza da riserve di cibo selvatico alla utilizzazione di quelle coltivate e allevate sarebbe stata naturalmente graduale. In realtà, perfino oggi, nel Sud-est asiatico questo passaggio non è stato ancora completato. La gente dei paesi e anche quella delle grandi città raccoglie ancora prodotti selvatici e molti di questi sono reperibili anche nei mercati. Gli animali selvatici sono cacciati e catturati dovunque è possibile e rappresentano un considerevole contributo alla limitata quantità di proteine destinate all'uomo.

Semplice utensile di rame, usato forse come ascia; è stato trovato nel 1968 in una tomba a Non Nok Tha. L'incavo a una estremità rende l'utensile unico nel suo genere.

La lavorazione del bronzo a Non Nok Tha comprendeva la fusione di teste d'ascia in stampi di pietra. Nell'illustrazione si vedono le due metà di uno stampo e l'ascia corrispondente (*a*, *a'*, *b*); vi sono raffigurate inoltre, viste di profilo e dall'alto, tre tipiche teste d'ascia, in cui sono visibili gli incavi nei quali erano inseriti i manici di legno.

L'inizio del Periodo estensionistico coincise con la fine del Pleistocene. Il livello dei mari, piú basso durante le epoche glaciali del Pleistocene, faceva sí che il Sud-est asiatico avesse una estensione doppia di quella attuale. La costa correva lungo il limite dell'attuale arcipelago della Sonda, e le isole dell'Indonesia occidentale e le Filippine erano collegate al continente. Vicino alla costa attuale sono stati trovati pochi siti hoabinhiani; sembra logico supporre che molti degli insediamenti estensionistici fossero situati nelle valli fluviali e sulle spiagge ora sommerse. Il lento sollevarsi del mare, che accompagnò l'ultima ritirata dei ghiacciai continentali, deve aver costretto alcune popolazioni a ritirarsi verso la zona continentale, mentre altre sono restate sulle isole. Gli abitanti delle isole della Sonda che si ritirarono verso la costa della Cina meridionale e il Nord Vietnam erano probabilmente gli antenati delle popolazioni che affrontarono senza difficoltà il mare a cominciare dal 4000 a.C. e che si spinsero lontano fino al Madagascar, a poca distanza dalle coste africane, e fino all'isola di Pasqua, a poca distanza dalle coste dell'America del Sud.

Quali sarebbero stati i cambiamenti materiali man mano che le varie culture locali si sviluppavano in questo periodo? Ancora una volta i ritrovamenti effettuati nella Caverna dello spirito e a Non Nok Tha possono fornirci delle indicazioni. I coltelli di ardesia rinvenuti nei livelli superiori della Caverna dello spirito assomigliano molto al tipo usato oggi per raccogliere il riso in alcune zone dell'Indonesia. È possibile che il riso fosse una pianta

Non comuni a Non Nok Tha questi vasi decorati si trovavano nei livelli piú bassi del tumulo, dove le tombe sono vecchie di 5000 anni. Un motivo decorativo, che combina triangoli dipinti con un tratto curvilineo (*a sinistra*) si ritrova sulle terraglie trovate nella stessa regione in siti prossimi alla costa, come la caverna vicino a Kalamay nell'isola di Masbate (*a destra*).

che gli ultimi abitanti della Caverna dello spirito raccoglievano e forse coltivavano? Il cereale era certamente noto a Non Nok Tha forse non piú di 1500 anni piú tardi, come hanno rivelato le impronte di chicchi di riso ritrovate sulle terraglie.

L'analisi metallurgica dell'utensile di rame portato alla luce da Bayard a Non Nok Tha dimostra che contiene tracce di fosforo e di arsenico. Questo fa pensare che l'utensile non sia stato modellato soltanto battendo una pepita del metallo ma che il rame sia stato fuso oppure trattato in altro modo col calore; questo implica che gli abitanti del sito avessero nel quarto millennio a.C. un certo grado di tecnica metallurgica. Non molto tempo dopo la gente di Non Nok Tha fondeva il bronzo in forma di utensili incavati molto simili a quello precedente di rame. A Non Nok Tha non è stata trovata traccia di minerali di rame, stagno e piombo – i tre metalli usati in questa regione per fare il bronzo – in associazione con l'attrezzatura per la lavorazione del rame. O i minerali venivano fusi in qualche altra parte del sito, o i metalli purificati o il bronzo stesso raggiungevano Non Nok Tha attraverso canali commerciali.

Siamo portati a concludere che la metallurgia relativamente avanzata praticata a Non Nok Tha durante il quarto e il terzo millennio a.C. avesse le sue radici in una tecnologia metallurgica precedente di qualche altra parte della regione. Se si dà il giusto peso al fatto provato che gli utensili metallici incavati erano sconosciuti fuori della regione fino al 2000 a.C. sembra inevitabile un'altra conclusione: lo sviluppo della metallurgia nel Sud-est asiatico era probabilmente indipendente e senza alcun rapporto di discendenza dallo sviluppo della metallurgia del Medio Oriente.

Resta un enigma importante. Ammessa la diffusione della coltivazione delle piante e del domesticamento degli animali, ammessi i progressi nella metallurgia e nello sviluppo del commercio, è sorprendente che l'intero periodo estensionistico non sia segnato dal tipo di evoluzione sociale che accompagnò gli stessi eventi nel Medio Oriente. Non troviamo né il sorgere di città né la crescita di un potere politico centralizzato. Perfino piú tardi, nel secondo e nel primo millennio a.C., sono sconosciute le fortificazioni in tutto il Sud-est asiatico, il che fa pensare alla totale assenza di guerre organizzate. Con un'unica possibile eccezione sembra che le varie culture della regione abbiano condiviso un tipo di base economica ben poco diverso e abbiano tenuto volentieri contatti reciproci rimanendo tuttavia politicamente indipendenti. L'eccezione è costituita dalla cultura della regione corrispondente all'attuale Nord Vietnam e alle regioni attigue della Cina; durante il secondo millennio a.C. può darsi che in quest'area sia sorta un'autorità centralizzata del tutto indipendente dalle dinastie imperialistiche della Cina settentrionale. È necessaria però un'ulteriore ricerca archeologica prima di poterne determinare l'effettivo grado di sviluppo.

I primi anni dell'Era cristiana coincisero con l'inizio del periodo piú recente del Sud-est asiatico, che io chiamo Periodo degli imperi in lotta. È stato allora che, a causa delle influenze religiose e politiche indiane, comparvero finalmente nella regione i primi stati centralizzati, proprio come erano apparsi in India. Una volta consolidatisi, fiorirono per circa 1500 anni molti staterelli, in larga misura sfruttatori delle popolazioni della regione. A cominciare dal XVI secolo e proseguendo fino al XX, l'imperialismo europeo soppiantò gradatamente i governanti indigeni, e il cambiamento non fece molta differenza per gli abitanti. L'occupazione della Caverna dello spirito era naturalmente finita molto prima che cominciasse il Periodo degli imperi in lotta; se si eccettua la comparsa del ferro e del bufalo indiano, i documenti archeologici di Non Nok Tha furono scarsamente influenzati dagli eventi del periodo.

Seguendo la ritirata dei colonialisti europei dopo la seconda guerra mondiale, anche il Periodo degli imperi in lotta ebbe fine. Oggi il Sud-est asiatico è in un intervallo di riordinamento che è stato reso piú complesso in egual misura dal crollo degli imperi e delle filosofie. Il minimo che si può sperare per una regione in cui l'uomo primitivo compí passi cosí notevoli lungo la strada della civiltà è il ritorno a un sistema del «vivi e lascia vivere» di indipendenza culturale che ha caratterizzato cosí gran parte della sua preistoria.

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Alcuni rompicapi che riguardano i numeri, la logica e le probabilità

Ormai per tradizione, ogni tanto in queste colonne si presenta una selezione di brevi ma curiosi problemi di svariata natura. Gli otto problemi che presentiamo questa volta risultano per la maggior parte risolvibili da chiunque abbia una *forma mentis* di tipo matematico. L'unico problema che richieda delle specifiche conoscenze matematiche, che oltrepassano quelle normalmente offerte dalla scuola media superiore è il secondo; anche in questo caso, però, le nozioni di teoria delle probabilità che entrano in gioco sono di natura estremamente elementare. Le risposte a tutti i problemi proposti saranno fornite nel prossimo numero.

1.

Un foglio di carta uso bollo di centimetri 25 per 17, ha un'area di 425 centimetri quadrati. Sette schede formato 6 per 10 cm, hanno un'area complessiva di 420 cm². Evidentemente non sarà possibile ricoprire mediante le schede tutta la superficie del foglio essendo questa superiore all'estensione totale delle schede; ma ci chiediamo qual è la massima porzione del foglio che può essere ricoperta mediante le schede. Le schede possono essere disposte sul foglio di piatto e in nessun caso possono essere piegate o ritagliate. Esse possono ovviamente essere sovrapposte ai bordi del foglio o sovrapporsi fra loro e la loro disposizione può essere qualsiasi, cioè parallela o no ai bordi del foglio o ai bordi di altre schede. La figura qui sotto mostra come le schede possono disporsi a ricoprire un'area di 395 cm². Non è però questa la maggiore area ricopribile.

Si tratta di un rompicapo tipico da famiglia, cui possono facilmente applicarsi tutti, sia giovani che anziani. Ci si procura facilmente il materiale occorrente: il foglio può ottenersi ritagliando un pezzo di cartoncino secondo le dimensioni proposte, 25 per 17 centimetri, e dello stesso materiale possono essere fatte le sette schede 6 per 10 centimetri. Risulta molto utile tracciare sul foglio un reticolato di linee perpendicolari fra loro in modo da suddividerlo in tanti quadratini di lato 1 cm, per facilitare il computo delle aree che restano scoperte in ognuna delle composizioni che verrà tentata.

Quanta parte del foglio può essere ricoperta con sette schede?

Questo problema presenta almeno due motivi di sorpresa. Esso fu proposto per la prima volta nel dicembre 1961 da Jack Halliburton nel « Recreational Mathematics Magazine »; un primo motivo di sorpresa consiste nel fatto che alcuni lettori sono stati in grado di fornire soluzioni « migliori » di quella segnalata dallo stesso Halliburton. La seconda sorpresa consiste nella recente scoperta da parte di Stephen Barr di una disposizione ancor più soddisfacente che verrà illustrata nel prossimo numero. Non esiste però ancora nessuna dimostrazione del fatto che la soluzione proposta dal Barr sia la migliore, ossia quella che permette di ricoprire l'estensione massima. Può quindi accadere che qualcuno dei nostri lettori introduca un terzo elemento di sorpresa proponendo una disposizione che permetta di ricoprire una estensione ancor maggiore.

2.

Un matematico, la moglie e la loro giovane figlia giocano spesso insieme delle piacevoli partite a scacchi. Un giorno la figlia si rivolse al padre per avere diecimila lire con le quali poter passare un sabato sera con gli amici. Il padre, sentita la richiesta, tirò alcune boccate di fumo dalla pipa e quindi replicò: « Oggi è mercoledí: tu giocherai una partita a scacchi questa sera, un'altra domani e un'ultima partita la giocherai venerdí. Io e tua madre ci alterneremo come tuoi avversari. Se vincerai due partite consecutivamente ti darò i soldi per il sabato sera. »

« Con chi giocherò la prima partita, con te o con la mamma? »

« Sei libera di scegliere con chi iniziare », rispose il matematico con fare divertito.

La figlia sapeva che il padre era un giocatore piú forte della madre. Per rendere massima la sua probabilità di vincere due partite consecutivamente, alla figlia converrà seguire lo schema di gioco padre-madre-padre o madre-padre-madre? L'autore di questo divertente problema è Leo Moser, un matematico della Università di Alberta. Per la sua risoluzione sono richieste solo elementari nozioni di calcolo delle probabilità. Naturalmente la risposta dovrà essere dimostrata e non solo proposta in base a congetture non rigorose o a considerazioni dettate dall'intuito.

```
  E E O            P P P
    O O              P P
E O E O          P P P P
E O O          P P P P
O O O O O      P P P P P
```

Due strani crittogrammi.

3.

Nella maggior parte dei crittogrammi si sostituiscono lettere diverse e cifre diverse in un semplice problema matematico. I due crittogrammi che qui proponiamo, visibili nella illustrazione in alto, sono, nel loro genere, alquanto originali e fuori della norma; entrambi sono però facilmente risolvibili qualora si ricorra a un ragionamento logico. Entrambi i crittogrammi ammettono un'unica risoluzione.

Nel prodotto proposto a sinistra, recentemente ideato da Fitch Cheney dell' Università di Hartford, ogni *E* sta a indicare una cifra pari, mentre gli *O* indicano una cifra dispari. Il fatto che la *E* rappresenti una cifra pari non deve portare ovviamente a credere che tutte le cifre pari che compaiono nel problema siano uguali. Per esempio, una delle *E* potrebbe rappresentare il 2, un'altra *E* il 4 e cosí via. Lo zero si considera come una cifra pari. Il lettore è invitato a ricostruire in termini numerici il problema proposto.

Nel prodotto di destra, ognuna delle *P* sta ad indicare una cifra prima (2, 3, 5 o 7). Questo affascinante problema fu per la prima volta proposto circa 35 anni fa da Joseph Ellis Trevor, un chimico della Cornell University; da allora è diventato un classico.

4.

Se da un quadrato si ritaglia un quadratino, pari a un quarto del quadrato di partenza e comprendente uno dei suoi vertici, è possibile dividere la superficie rimanente in quattro parti congrue (parti cioè aventi forma e dimensioni uguali)? Sí, è possibile come mostra la figura a sinistra dell'illustrazione in basso. In modo del tutto analogo anche un triangolo equilatero a cui sia tolto, a partire da uno dei vertici, un triangolino avente una superficie pari a un quarto della superficie totale, risulta sezionabile in quattro parti fra loro congrue, come è visibile al centro della illustrazione qui sotto. Questi sono alcuni tipici esempi della grande varietà di rompicapi geometrici. In generale il problema consiste, data una certa figura geometrica, nello scomporla in un determinato numero di figure congrue fra loro e che ricomposte ripropongano la figura assegnata.

Il quadrato rappresentato a destra nella figura può essere scomposto in cinque parti congruenti? Sí, e il modo di farlo è unico. I pezzi in cui può attuarsi la scomposizione possono avere forma arbitraria, a patto che sia la stessa e di dimensioni uguali per tutti. (Si può « ribaltare » un pezzo asimmetrico; in altri termini, un pezzo è ritenuto uguale alla sua immagine speculare). Il problema si presenta alquanto ostico e difficile, ma improvvisamente la soluzione si proporrà in modo chiarissimo.

5.

Robert Abbott, autore del volume *Giochi a quattro carte*, propone la curiosa mappa stradale riprodotta nella illustrazione della pagina seguente, accompagnata dalla storiella che segue:

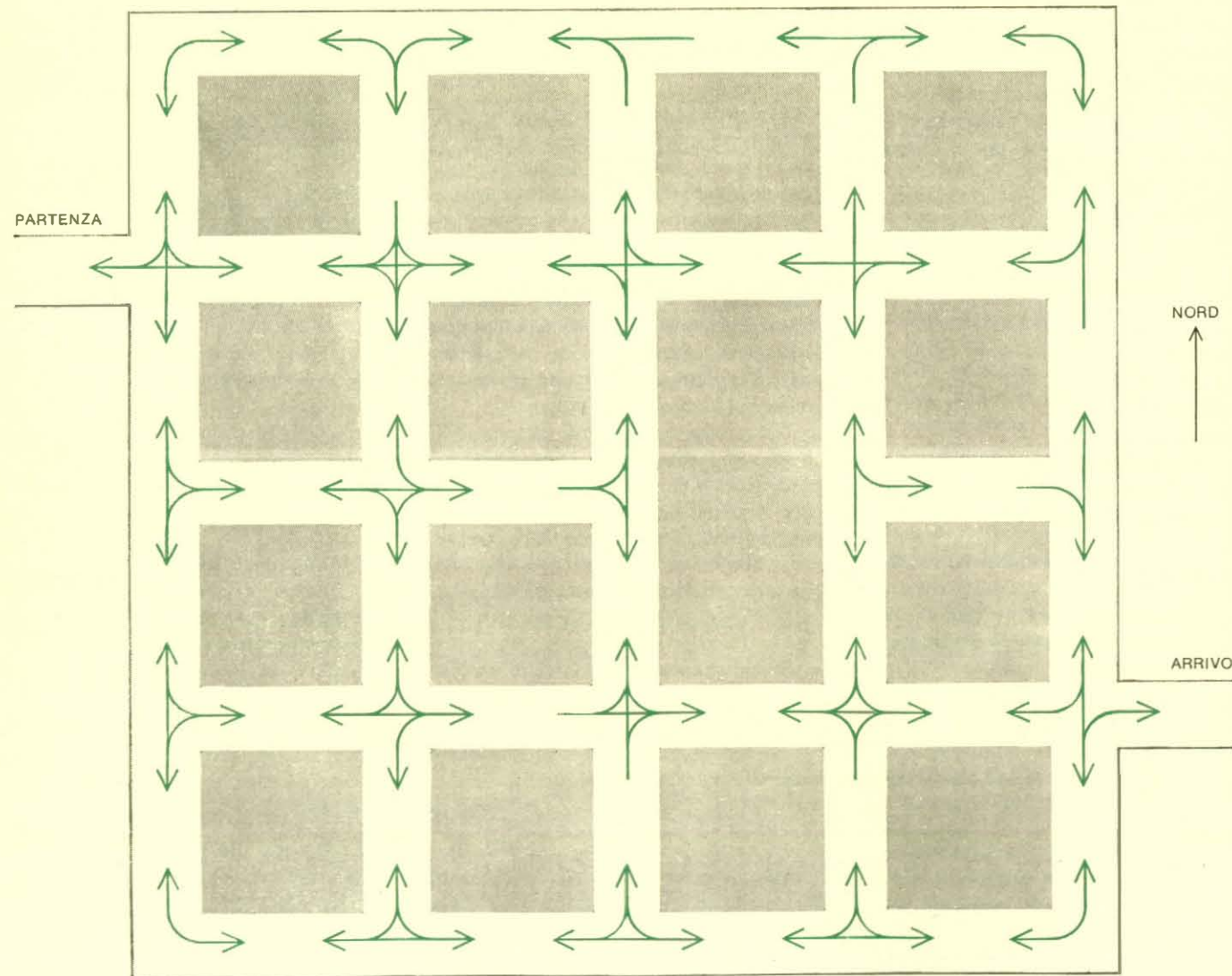
« Poiché la città di Floyd's Knob, nell'Indiana, aveva immatricolato solo

Tre problemi di dissezione.

37 automobili, il suo sindaco pensò bene di appoggiare, per la elezione ad assessore del traffico, un suo cugino, Henry Stables, fino ad allora stradino della città. Ben presto però rimpianse la sua decisione. Infatti una mattina la città, al suo risveglio, trovò tutta la segnaletica sconvolta. Nel corso della notte erano stati affissi un enorme numero di segnali stradali che stabilivano moltissimi sensi unici e confuse restrizioni alla circolazione stradale.

I cittadini reagirono immediatamente proponendo l'eliminazione dei segnali introdotti nottetempo; prima che ciò fosse attuato, però, il capo della polizia locale, un altro cugino del sindaco, fece una sorprendente scoperta. Gli automobilisti che circolavano per la città, a causa della nuova segnaletica, si esasperavano a tal punto che prima o poi ognuno di essi si arrischiava a percorrere qualche senso vietato. Il capo della polizia constatò che le entrate nelle casse cittadine dovute alle contravvenzioni derivanti dalla nuova situazione risultavano essere superiori a quelle che normalmente venivano incassate per violazioni alle norme stradali nel resto della rete stradale esterna.

Naturalmente quasi tutti i cittadini, dato il basso numero di automobili, risultarono abbastanza soddisfatti, tanto più che il giorno successivo sarebbe stato sabato e Moses MacAdam, il più ricco colono della contea, avrebbe dovuto transitare, per recarsi in Municipio, proprio per la città. Si pensava ovviamente di poter ricavare dal Moses una bella sommetta, dato che certamente avrebbe commesso qualche infrazione. Ma Moses si era in segreto ben studiato la nuova segnaletica cittadina. Venne il sabato mattina ed egli letteralmente stupì tutti i cittadini recandosi dal suo podere fino al municipio della contea attraversando tutta la città senza incorrere in alcuna violazione! ».

Chi è in grado di scoprire il percorso eseguito dal Moses? A ogni incrocio si può seguire la direzione indicata da una delle frecce. In altre parole, è lecito curvare lungo una certa direzione solo quando esiste un arco orientato che la indichi e analogamente si potrà proseguire lungo un certo rettifilo solo quando lungo esso esiste una freccia che indichi questa possibilità. Si potrà cambiare direzione solo in prossimità di uno degli incroci. Per esempio, al primo incrocio che si incontra dopo la partenza dal podere, è possibile scegliere solo fra due alternative: o curvare verso nord o procedere in linea retta. Se si procede in linea retta, all'incrocio successivo si presentano ancora due sole possibilità di scelta: o procedere ancora in linea retta o svoltare verso sud. Si noti, infatti, che in tale incrocio, pur esistendo un arco curvato verso nord, esso non è orientato da una freccia che indichi il nord: ciò sta appunto a escludere la possibilità di imboccare il rettifilo in direzione nord.

Sensi unici e sensi vietati.

6.

Capita, ogni tanto, che una rivista presenti una facciata contenente un disegno che comprende la facciata stessa della rivista a cui appartiene, in proporzioni ovviamente minori, sulla cui copertina comparirà un disegno ancor più piccolo a sua volta rappresentante la stessa facciata della rivista, e così via, potenzialmente fino all'infinito. Infinite miniaturizzazioni successive dello stesso oggetto, sull'esempio di quella appena citata, rappresentano una frequente causa di confusione e a livello logico e a livello semantico. Qualche volta la gerarchia infinita può essere evitata, altre volte no. Il matematico inglese J. E. Littlewood, che esamina questioni relative a questa problematica in uno dei suoi libri, ricorda tre note che apparivano alla fine di un suo articolo. L'articolo era stato pubblicato su una rivista francese e le note, tutte in francese, sono:

« *1.* Io sono molto grato al prof. Riesz per la traduzione di questo articolo. »

« *2.* Io sono molto grato al prof. Riesz per la traduzione della precedente nota ».

« *3.* Sono molto grato al prof. Riesz per la traduzione della nota precedente ».

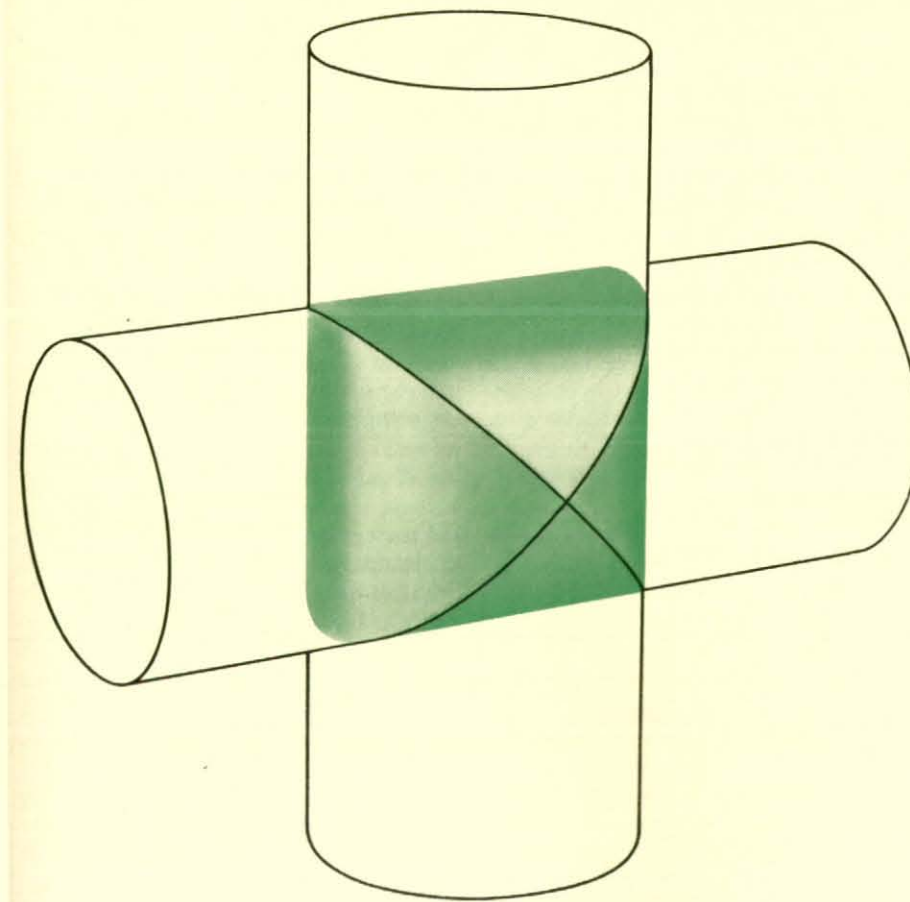
Supponendo Littlewood completamente all'oscuro di una qualsiasi nozione di lingua francese, mediante quale ragionevole artificio poté evitare di ricorrere a un numero infinito di note successive del tipo visto, limitandosi anzi a tre sole note?

7.

Un antico problema numerico, che viene spesso riproposto come originale, consiste nell'inserire fra le cifre 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dei simboli di operazioni matematiche, in modo tale che l'espressione che ne deriva sia uguale a 100. Le cifre vanno considerate nell'ordine in cui sono state scritte. Vi sono molte centinaia di soluzioni finora note, la più semplice delle quali è

$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + (8 \times 9)$.

Il problema diviene degno di attenzione se i segni di operazione di cui si può fare uso vengono limitati al segno più e al segno meno. Anche in questo caso sono note molte soluzioni, per esempio eccone alcune:

$1 + 2 + 34 - 5 + 67 - 8 + 9 = 100$,
$12 + 3 - 4 + 5 + 67 + 8 + 9 = 100$,
$123 - 4 - 5 - 6 - 7 + 8 - 9 = 100$,

Il problema di Archimede sui cilindri che si incrociano.

La quadratura del vaso proposta il mese scorso.

123 + 4 — 5 + 67 — 89 = 100,
123 + 45 — 67 + 8 — 9 = 100,
123 — 45 — 67 + 89 = 100.

Proprio in virtú della larga popolarità di cui gode il problema, risulta alquanto sorprendente il fatto che ben poca attenzione sia stata posta al problema inverso. In altre parole, prendere le stesse cifre, disponendole però in ordine inverso, dal 9 all'1, e formare una espressione che assuma come valore 100, mediante l'inserimento del minor numero possibile di segni « piú » o « meno » fra le cifre o raggruppamenti di cifre.

8.

Fra i piú notevoli meriti di Archimede sta l'avere anticipato alcuni dei fondamentali concetti che stanno alla base del calcolo integrale. Il problema illustrato a pagina 87 è un classico esempio di problema che la maggior parte dei matematici odierni riterrebbe assolutamente irrisolvibile senza l'aiuto del calcolo integrale (infatti, esso si ritrova spesso in molti testi di analisi) ma che in realtà è risolvibilissimo grazie all'ingegnosissimo metodo ideato da Archimede. I due cilindri circolari si intersecano ad angolo retto. Se entrambi i cilindri sono di raggio unitario, qual è il volume del solido (*in colore*) comune ai due cilindri?

Non si pretende certo che venga riscoperta l'esatta via mediante la quale Archimede risolse il problema. In realtà, esiste una via molto semplice mediante la quale giungere alla risoluzione; è infatti sufficiente ricordare qualcosina di piú oltre alla formula che fornisce l'area del cerchio (π volte il quadrato del raggio) e a quella che fornisce il volume di una sfera (quattro terzi di π volte il cubo del raggio). Può, ovviamente, anche essere usato il metodo di Archimede. In ogni caso, questo è divenuto un classico esempio di come spesso, trovando il giusto approccio a un problema, si possa evitare di rivolgersi al calcolo integrale.

Il mese scorso avevamo chiesto di determinare la lunghezza del lato del quadrato che aveva area uguale a quella del vaso disegnato con archi di cerchio del diametro di 10 centimetri. La risposta è 10 centimetri. Osservando i quadrati tratteggiati dell'illustrazione qui accanto, è ovvio che i settori A, B, C vanno a riempire gli spazi A', B', C' per formare due quadrati aventi una area totale di 100 centimetri quadrati. L'illustrazione in basso mostra come è possibile « quadrare » il vaso tagliandolo in tre parti che formano un quadrato di 10 centimetri di lato.

LIBRI

Materia e antimateria

di Girolamo Ippolito

Questo piccolo volume, che oltre tutto si segnala per la grande chiarezza dell'esposizione, arricchita da suggestivi diagrammi e figure, espone la teoria cosmogenetica del professore svedese Oskar Klein, nella forma finale raggiunta dopo lunghi studi ai quali ha contribuito anche l'autore del volumetto. Questa teoria si basa sui seguenti principi:
1) Ammette solo leggi fisiche che si sono potute studiare nei laboratori di fisica senza l'introduzione di nuove ipotesi *ad hoc*, come quella di Milne, che suppone che le costanti fisiche possano variare col tempo, o quella di Bondi, Gold e Hoyle, che suppone una continua creazione di nuova materia nell'universo. Infatti con ipotesi *ad hoc* qualunque fenomeno si può spiegare. Il pregio di una teoria sta nella possibilità di non servirsi di altre leggi che quelle sperimentabili e sperimentate.
2) Tiene conto del fatto che i recenti progressi della fisica atomica hanno mostrato in modo indiscutibile l'esistenza di una *antimateria*, cioè di particelle elementari (positone, antiprotone) che sono analoghe a quelle di cui è costituito il mondo della nostra fisica (elettrone, protone) ma con carica elettrica opposta. È chiaro che in presenza della materia ordinaria (che il Klein suggerisce chiamare *coinomateria*) le particelle di antimateria prodotte in laboratorio si annientano al primo urto con la coinomateria, con sviluppo di energia secondo la nota legge di Einstein. Per un principio di simmetria Klein suppone che nell'universo vi debba essere tanta coinomateria quanta antimateria e il problema è solo di vedere come esse possano coesistere senza annullarsi, o annullandosi solo in parte.

DUE MONDI SPECULARI di Hannes Alfvén, Il Saggiatore, Milano, 1971 (L. 1200).

Nei primi due capitoli, dopo alcuni richiami di carattere generale, l'autore prende in esame il famoso spostamento verso il rosso delle righe spettrali emesse dalle galassie, spostamento proporzionale alla distanza da noi di ogni galassia (la cosiddetta legge di Hubble); e mostra che, non volendo introdurre ipotesi *ad hoc*, come si è già detto, non resta altra spiegazione che quella di un allontanamento delle galassie le une dalle altre, cioè l'espansione dell'universo; spiegazione nella quale la maggior parte degli scienziati è d'accordo. È presa poi in esame la teoria di Lemaitre e Gamow, per la quale si ipotizza che tutta la materia della galassia, cioè tutta la *metagalassia*, fosse stata concentrata all'inizio, che può porsi circa 10 miliardi di anni or sono, in un unico densissimo *atomo primordiale*, che Gamow chiama *ylem*, racchiuso in una sfera del diametro dell'ordine di un settantamillesimo di anno luce (cioè pari all'incirca alla distanza fra la Terra e il Sole). In questo momento iniziale sarebbe avvenuta una immensa esplosione (il *big-bang*) di tutta la materia e ora noi saremmo ancora nel periodo di espansione di questo scoppio. Gamow è giunto a fissare quello che sarebbe avvenuto minuto per minuto nella prima ora di questa esplosione (si veda l'articolo *La sfera di fuoco primordiale* di P.J.E. Peebles e D.T. Wilkinson in « Le Scienze », n. 2, ottobre 1968).

La cifra di 10 miliardi di anni è determinata conoscendo la distanza e la velocità di allontanamento delle galassie e presumendo che non vi sia stato nessun cambiamento di velocità. Alfvén osserva giustamente che, essendo le galassie attratte dalla gravitazione universale, la velocità verso l'esterno della nuvola esplodente ha avuto la tendenza a rallentare e pertanto il tempo di 10 miliardi di anni va considerato eccessivo. I sostenitori di questa teoria lasciano nel vago quello che sarebbe accaduto prima, e pertanto occorre ricorrere a un atto di creazione, il che sembra poco convincente. Questo dell'atto di creazione spiega il favorevole accoglimento della teoria presso gli scienziati cattolici (si veda per esempio i volumi *Come si evolvono i cieli* del gesuita Vincenzo Arcidiacono, Rizzo Nervo, Messina).

L'autore mostra poi come sia impossibile pensare che l'*ylem* si sia formato per contrazione da un universo diffuso. Molto piú logico è pensare che in un tale universo le parti attratte verso il centro di gravità si siano avvicinate senza collidere fra loro tutte nel medesimo istante muovendosi lungo traiettorie iperboliche, per cui gli elementi dell'universo sono passati a una distanza non grande dal centro ma tale che nel momento in cui l'universo si è trovato alla sua minima dimensione esso occupasse non uno spazio pari alla distanza fra Terra e Sole, bensí una sfera dell'ordine di un miliardo di anni luce. Dei diagrammi molto suggestivi illustrano questa ipotesi.

Ora mentre la teoria dell'*ylem* implica che tutto l'universo sia formato da materia comune o *coinomateria* – cosa che contrasta con quella legge fondamentale che è la simmetria e che perciò ripugna al nostro spirito – la teoria di Klein è compatibile con la presenza di *coinomateria* e di *antimateria* se si può dimostrare che quando queste due specie di materia siano abbastanza distanti fra loro l'annichilazione dovuta ai reciproci urti sia notevolmente limitata. Questo è appunto il nucleo centrale della teoria di Klein. Per dimostrarlo l'autore, nel terzo capitolo, tratta della struttura delle due specie di materia, rifacendosi alla scoperta in laboratorio prima del positone e poi dell'antiprotone e ai fenomeni di annichilazione per cui particelle di coinomateria e antimateria, quando si incontrano, spariscono dando luogo a formazione di energia, sotto forma di radiazione e secondo la equivalenza di Einstein.

Viene anche chiarito come un mondo di antimateria, (per esempio una *antistella* o una *antigalassia*) sarebbe indistinguibile con osservazioni astronomiche perché le radiazioni emesse sono le stesse per una stella e per una antistella se esse hanno magnetizzazione opposta. Le righe spettrali restano le stesse e l'effetto Zeemann (spostamento delle linee spettrali dovuto al campo magnetico) è eguale per una stella di coinomateria, il cui campo magnetico volga il polo nord verso di noi, e per una stella di antimateria, che volga verso di noi il polo sud.